

nº 3 RAEE) [18], que en conjunto supondrían un objetivo de 0,8 kg/habitante/año para los residuos objeto de tratamiento.

Teniendo en cuenta el número aproximado de 1.700.000 habitantes en la CAPV que han participado en esta experiencia durante el año 2000 y los kilogramos de material recibido en ese año de línea marrón (475.117 kg) y línea gris (235.590 kg), a continuación se expone la siguiente Tabla 8.2.1.1.3:

			Reciclaje actual
LÍNEA MARRÓN	Objetivo Unión Europea	0,60 kg/hab/año	100 %
	Tratamiento Real Actual	0,28 kg/hab/año	46.6 %
	Potencial Restante	0,32 kg/hab/año	54.4 %
LÍNEA GRIS	Objetivo Unión Europea	0,20 kg/hab/año	100 %
	Tratamiento Real Actual	0,14 kg/hab/año	69.2 %
	Potencial Restante	0,06 kg/hab/año	30.8 %

Tabla 8.2.1.1.3 Objetivos de reciclaje en Bilbao y la CAPV

De acuerdo con la Tabla 8.2.1.1.3 anterior, se puede afirmar que el grado de respuesta en lo relativo a línea gris (equipos informáticos) es muy alto apuntando a conseguir en breve el objetivo europeo con la adhesión del total de la población. En lo referente a línea marrón se puede concluir que continúa la progresión, si bien y debido a la mayor diversidad en los tipos de aparatos se ve necesario el incidir de forma específica en la información a fin de conseguir que la respuesta abarque a todas las líneas de aparatos incluidos en esta categoría.

En el futuro estas cifras van a incrementarse en función de un mayor número de equipos que llegan al final de vida siguiendo el ritmo ascendente de las ventas de estos productos que se produjo en su momento, la mentalización y facilidades que se están ofreciendo a la población, la instalación de nuevos puntos limpios en los municipios e instalaciones similares en algunos de los centros comerciales, la mayor selectividad en la recogida de voluminosos que ofrecen cada vez más ayuntamientos y por supuesto la respuesta favorable de los consumidores cada vez más convencidos de la importancia de estas prácticas.



8.2.2. Experiencia en Cataluña: El Pont de Vilomara i Rocafort

El Pont de Vilomara i Rocafort, un municipio de El Bages, Barcelona, en una apuesta por el desarrollo sostenible de la comunidad, está configurando en su entorno un complejo medioambiental pionero en España en la valorización de los residuos eléctricos y electrónicos.

En esta población se localizan el Centro de Tratamiento y Reciclaje de frigoríficos, explotado por TPA S.A. y el Centro de Tratamiento y Reciclaje de Pilas y Fluorescentes, explotado por PILAGEST S.L., ambos servicios públicos de la Generalitat de Catalunya y con considerables años de experiencia en la gestión de estos residuos. Además, se está llevando a cabo el desarrollo del Centro de Valorización de Residuos de Equipos Eléctricos y Electrónicos enfocado hacia los objetivos de ámbito europeo impuestos en la Directiva sobre RAEE. La planta esta siendo construida y será explotada por PILAGEST S.L. e INDUMETAL RECYCLING S.A..

En adición a estas instalaciones, en Cataluña, el pasado mes de marzo de 2003, se constituyó la Societat de la Informació Solidària i Sostenible a Catalunya (SISOSCAT), la cual se encargará de combatir los desequilibrios de la sociedad de la información y de velar por el reciclaje y la correcta eliminación de los equipos informáticos y tecnológicos. SISOSCAT es un proyecto del gobierno catalán que implica a cuatro departamentos: DURSI (Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació); Medi Ambient; Benestar i Família; y Treball, Indústria i Comerç. Uno de sus objetivos será facilitar la sustitución tecnológica e informática y contribuir a su reaprovechamiento. En los casos en los que no sea posible la reparación y reutilización de los equipos, se reciclaran los componentes que puedan ser útiles para la fabricación de otros bienes.

8.2.2.1. Centro de tratamiento y reciclaje de pilas y fluorescentes

PILAGEST, S.L. gestiona en El Pont de Vilomara i Rocafort, bajo adjudicación de la Junta de Residuos de la Generalitat de Catalunya, un centro de tratamiento de pilas de todo tipo, pilas botón y lámparas fluorescentes así como el servicio público de recogida de pilas y fluorescentes. PILAGEST, S.L. pertenece al 50% a SENDA AMBIENTAL, S.A. (Grupo Endesa) y a T.P.A., TÉCNICAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL, S.A. (Grupo FCC).

El centro tiene una capacidad para tratar 2.000 t/año de pilas de todo tipo, 15 t/año de pilas botón y 1.000.000 unidades/año de lámparas fluorescentes. El Centro ocupa una superficie de 11.400 m² de los que 3.000 m² están edificadas. Además de explotar la instalación, PILAGEST, S.L. también realiza la recogida de las pilas y lámparas fluorescentes en toda Cataluña. Con esta finalidad, la empresa ha distribuido unos 2.000



contenedores (llamados pirámides) en los centros colaboradores. El volumen de recogida es de 500 t/año [19].

El proceso de reciclaje de los fluorescentes rectos, los cuales se consideran propiamente RAEE, es el siguiente. Primero son pinchados para romper el vacío de su interior, posteriormente, en el proceso de desencapsulado, se calientan homogéneamente los extremos del tubo que, al ser luego enfriados de forma brusca con una gota de agua, se desprende en un corte espontáneo. El interior del tubo restante es soplado con un dispositivo de aire comprimido y escombrilla recogiendo su contenido en un ciclón. Una vez limpio del polvo luminiscente, el tubo se tritura y se almacena para su venta.

Las fracciones restantes se tratan, para su posterior valorización, en una cámara de destilación donde, una vez practicado el vacío, se producen temperaturas de hasta 550°C que provocan la liberación de su contenido en mercurio.

En la siguiente Tabla 8.2.2.1.1 se detallan las cantidades de fluorescentes tratados durante los años 1998-2001 en este centro de tratamiento en El Pont de Vilomara i Rocafort [19].

Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001 (sólo primer semestre)
64.362 kg/año	132.516 kg/año	190.876 kg/año	62.306 kg/año

Tabla 8.2.2.1.1 Cantidades anuales (kg/año) de fluorescentes tratados en el centro de tratamiento de El Pont de Vilomara i Rocafort

8.2.2.2. Centro de tratamiento y reciclaje de frigoríficos

TPA, S.A. gestiona en El Pont de Vilomara i Rocafort, como servicio público por adjudicación de la Junta de Residuos de la Generalitat de Catalunya, el centro de tratamiento y reciclaje de frigoríficos fuera de uso. El Centro tiene una capacidad para tratar unas 55.000 unidades anuales de frigoríficos y congeladores. La superficie total ocupada es de unos 5.000 m², de los que unos 3.500 están edificadas. El centro funciona desde el año 1995, siendo el primero y único que existe en el estado español [19].

Como ocurre con otros electrodomésticos, los frigoríficos usados contienen sustancias nocivas que es preciso extraer para evitar que se difundan sin control por la atmósfera o en aguas subterráneas. Los contaminantes más perjudiciales que contienen, son dos:



aceites en el circuito de refrigeración por un lado, y por otro, los CFCs contenidos en este circuito y en las espumas aislantes de sus paredes. Se debe considerar, sin embargo, que el caso de los frigoríficos es un caso singular de electrodomésticos, pues desde el año 1995 hubo un cambio sustancial en su diseño. La industria se vio obligada, gracias al Protocolo de Montreal y sus posteriores revisiones, a cambiar la tecnología y sustituir la utilización de CFCs por la de gases inocuos para el medio ambiente. No obstante, considerando que los frigoríficos son electrodomésticos de larga duración (aproximadamente quince años como media) y que son de uso básico (el 99,9% de hogares cuentan como mínimo con una unidad), se puede esperar que el volumen de frigoríficos usados, que contienen CFCs y que se generarán en los próximos 20 años, sea importante.

Para la recogida de las unidades de origen doméstico en Cataluña se tuvieron en cuenta la red de puntos limpios existentes, los ayuntamientos que contaban con sistemas de recogida de voluminosos, la importante red de gestores de metales con autorización de gestionar este tipo de residuos, la posibilidad de crear un sistema de recogida específico independiente y la colaboración de los industriales consumidores de frigoríficos, así como los distribuidores de frigoríficos nuevos. Por otra parte, las unidades de origen industrial llegan al centro de tratamiento, donde se tratan y reciclan, con la financiación de las mismas industrias generadoras.

El tratamiento específico para los frigoríficos en el centro consta de varias etapas. Al inicio del proceso se realiza la extracción del CFC y aceite del circuito mediante un equipo compacto que aspira su contenido y separa las fracciones de aceite y CFC automáticamente, facilitando su reciclado posterior. La extracción de CFC-11 de las espumas aislantes es más complicada, pues no se halla concentrada ni separada sino inmersa en las celdas del poliuretano. Para conseguir un buen rendimiento de la extracción, se tritura todo el mueble primeramente y posteriormente se compactan los pequeños trozos de espuma separados, todo ello en cámaras cerradas. De esas cámaras, el CFC extraído se conduce a un equipo capaz de retenerlo y licuarlo, ya sea mediante equipos de filtros de carbón activo o bien mediante equipos de licuación directa con nitrógeno.

Paralelamente a todo ello, también tiene lugar el reciclado y separación de los materiales que componen los frigoríficos. En una primera etapa por separación manual se extraen frontales y bandejas de aluminio, cables exteriores eléctricos y vidrio de las bandejas, en una segunda etapa, por una separación automática de la ya fracción triturada, mediante un extractor magnético y una mesa densimétrica se obtienen acero, aluminio, cobre y plásticos.



Actualmente más del 80% de los materiales que componen los frigoríficos y congeladores son valorizados por distintos recuperadores, mientras que el volumen final de la fracción no valorizable ocupa menos del 5% del volumen original. En la siguiente Tabla 8.2.2.2.1 se detallan las cantidades de frigoríficos tratados durante los años 1998-2001 en el centro de tratamiento en El Pont de Vilomara i Rocafort [19].

Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001
40.003 u/año	48.782 u/año	53.422 u/año	56.471 u/año

Tabla 8.2.2.2.1 Cantidades anuales (u/año) de frigoríficos tratados en el centro de tratamiento de El Pont de Vilomara i Rocafort

A continuación se detalla en la Figura 8.2.2.2.1 el proceso de tratamiento y reciclaje de frigoríficos en el centro de El Pont de Vilomara i Rocafort.



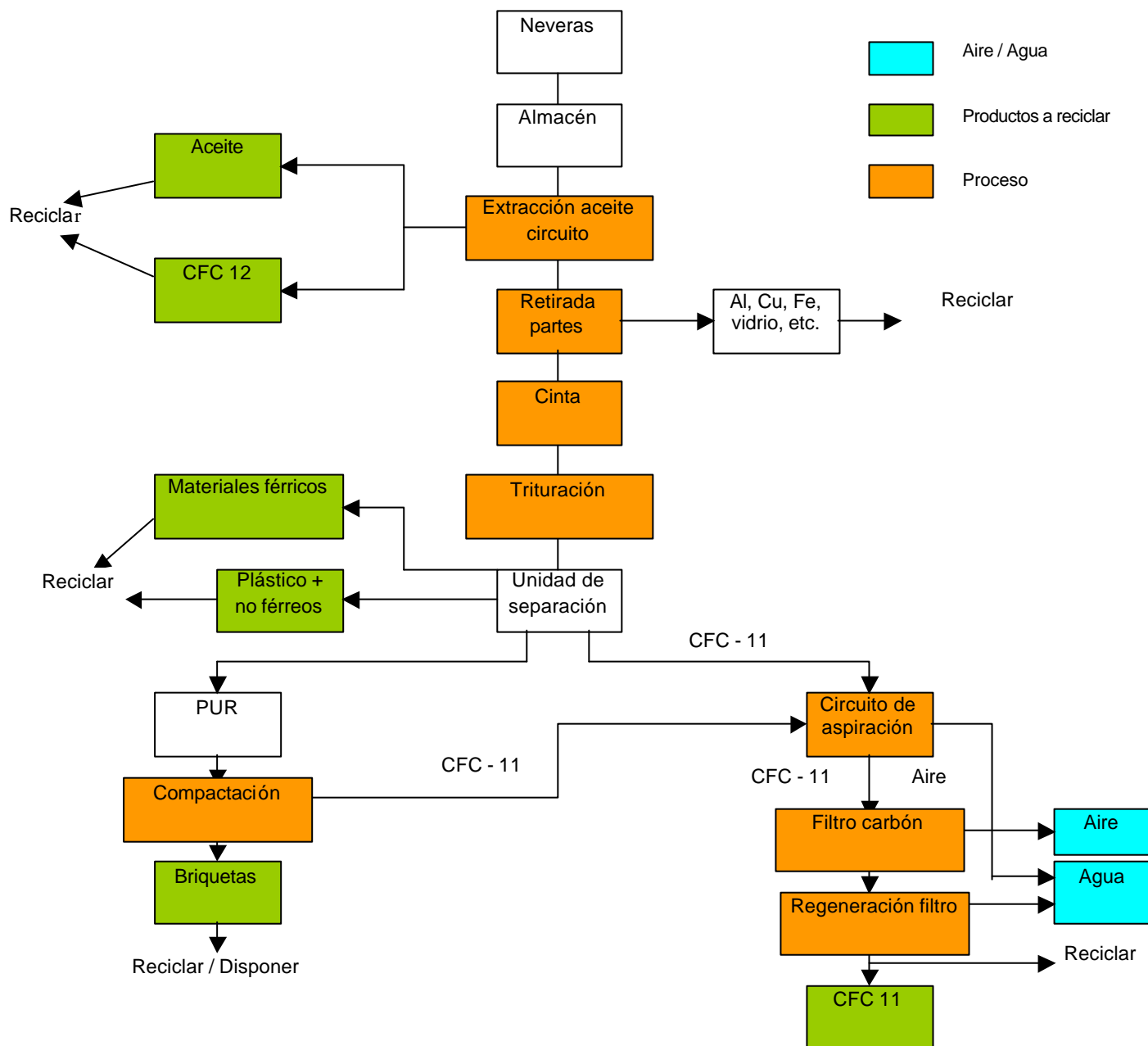


Figura 8.2.2.1 Esquema del proceso de tratamiento y reciclaje de frigoríficos en el centro de tratamiento de El Pont de Vilomara i Rocafort

8.2.2.3. Centro de valorización de RAEE

PILAGEST S.L. e INDUMETAL RECYCLING S.A. construyen en el Pont de Vilomara i Rocafort un centro para la valorización de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) generados en la comunidad catalana. Este Centro de Tratamiento está promovido por la Junta de Residus de la Generalitat de Catalunya mediante una subvención sobre la inversión material y un convenio que garantiza la aportación de los



RAEE de origen doméstico recogidos en los puntos limpios y campañas específicas en un plazo de cinco años.

Este centro realizará la recogida, reciclaje y valorización de los siguientes aparatos eléctricos y electrónicos averiados, obsoletos o en desuso:

- Equipos de tecnología informática y telecomunicaciones (ordenadores, teléfonos, impresoras, etc.).
- Equipos de imagen y sonido (televisores, vídeos, etc.).
- Pequeños electrodomésticos (aspiradores, molinos de café, etc.).
- Juguetes y equipos para el ocio.

El tratamiento de estos equipos seguirá las siguientes etapas:

- Test selectivo de equipos (básicamente equipos informáticos) con el objetivo de recuperar aquellos que sean reutilizables.
- Desmontaje de equipos no reutilizables con los siguientes objetivos:
- Recuperación de componentes para nuevos equipos.
- Recuperación del material reciclable como materia prima para otros usos: metales (aluminio, cobre, hierro, etc.), plásticos, papel.
- Separación de materiales para un tratamiento específico externo en plantas especializadas.
- Trituración del material reciclable como materia prima para otros usos con el objetivo de separarlos en sus correspondientes fracciones.

El Centro consistirá en una nave de unos 4.000 m² situada en el Polígono Industrial de El Pont de Vilomara y tendrá una capacidad de 5.000 t/año por turno. Se prevé un índice de recuperación superior al 80% [19].

A continuación se detalla en la Figura 8.2.2.3.1 el proceso de valoración de RAEE en el centro de El Pont de Vilomara i Rocafort.



una campaña piloto para la recogida y tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en áreas metropolitanas de Andalucía. Esta iniciativa se llevó a cabo tras la firma el 21 de Agosto de 2002 en Sevilla de un protocolo entre representantes de las tres empresas citadas, que configuran una Unión Temporal de Empresas (UTE), y el consejero delegado de la Empresa de Gestión Medioambiental (Egmasa), dependiente de la Junta de Andalucía.

Esta campaña piloto tiene la previsión de reciclar en el primer año un total de 1.000 toneladas de este tipo de residuos: unas 700 toneladas de flujo doméstico, de recogida en puntos limpios instalados al efecto, y unas 300 procedentes de un flujo industrial [20]. Para ello, se dispone de contenedores de 20 metros cúbicos que almacenan por separado aparatos de televisión, monitores y pequeños electrodomésticos de la línea marrón. Las áreas andaluzas donde se ha iniciado la experiencia se sitúan en la zona de Málaga, en Huelva y Sevilla, y en el área del Puerto de Santa María (Cádiz).

Al ser una campaña piloto pionera en Andalucía, la gestión de estos residuos se centraliza en un centro ubicado en Sevilla, que atiende de momento la recogida de todos los puntos limpios instalados en las áreas andaluzas citadas. El proyecto dispone además de una zona de desmontaje de televisión y monitores, que separa todos los elementos electrónicos para un tratamiento más conveniente.

De forma paralela al inicio de los trabajos se ha realizado asimismo una campaña de comunicación para la sensibilización de los ciudadanos, dirigida a empresas, entidades locales y público en general para que su colaboración ayude al éxito del proyecto. Tras esta primera fase, se informará de los resultados obtenidos y se abordarán las siguientes fases que se extenderán a otras áreas metropolitanas de Andalucía.

8.3. Ciclo general de reciclado de los RAEE

Una vez detalladas las distintas experiencias llevadas a cabo, en Europa y en España, en recogida y reciclaje de RAEE, ya se puede crear un esquema genérico del ciclo de reciclado de estos residuos. Para RAEE desechados que no tienen posibilidades de reutilización ni de recuperación de componentes o subconjuntos, se pueden distinguir cinco corrientes que predeterminan un posterior tratamiento, que en sí, suponen una especialidad técnica y/o comercial. Estas cinco corrientes son las siguientes:

- Grandes instalaciones que, generalmente, exigen un desmontaje previo in situ.
- Equipos que contienen vidrio activado o con plomo.
- Equipos que pueden contener CFCs, HCFCs o similares.



- Equipos sin vidrio y sin CFCs o similares con un cierto valor intrínseco.
- Equipos de iluminación.

Todos los equipos, independientemente de la corriente de tratamiento de la que procedan, deben someterse a un proceso de preparación y descontaminación donde se separan los componentes potencialmente peligrosos.

Para manipular estos residuos peligrosos debe disponerse de una autorización de gestor, emitida por la autoridad medioambiental competente. La descontaminación puede realizarse, dependiendo del componente a separar y la técnica disponible, antes o después del desmantelamiento.

Una vez descontaminado, se procede a la obtención de fracciones conteniendo materiales relativamente homogéneos que permiten un tratamiento específico posterior eficiente. Estas fracciones son:

- Fracción compleja rica en metales.
- Fracción de vidrios.
- Fracción de plásticos.
- Residuos finales.
- Componentes potencialmente peligrosos.

Cada una de estas fracciones requiere un tratamiento especializado que consiste básicamente en la progresiva liberación de los materiales valorizables y la obtención de concentrados, que cumpliendo ciertas especificaciones, los hacen aptos como materia prima secundaria, o en su caso, como residuos finales en los procesos correspondientes.

Las tres filosofías principales para el tratamiento de reciclaje de los RAEE son la aplicación de procesos mecánicos, procedimientos térmicos y tratamientos no térmicos o químicos [21].

El proceso mecánico se realiza con el objetivo de separar las partes macroscópicas de los residuos y para ello se utilizan molinos de martillos, clasificadores y separadores para clasificarlos en diferentes fracciones. Estas fracciones suelen remitirse a otras compañías para someterlas a otros tratamientos.

Los tratamientos térmicos que utilizan los RAEE como materia prima son usualmente procesos para la fundición de cobre. En este proceso se añaden los residuos mientras el



cobre se transforma. En el transformador se recuperan los materiales plásticos, mientras que el hierro y el aluminio se transfieren a la escoria, y los metales preciosos se aíslan después del proceso a refinamiento electrolítico del cobre en el lodo del ánodo.

En el tratamiento químico o no térmico se pueden recuperar los metales existentes en los residuos electrónicos, en particular de tarjetas de circuitos impresos y de componentes electrónicos, mediante la utilización de ácidos o de lixiviación cáustica. También existen procesos de reciclado químico para los materiales plásticos, como son la glicolisis, la hidrolisis, la hidrogenación y la gasificación, entre otros.

Dentro de los procesos químicos para la recuperación y reciclado de metales se sitúa el tratamiento hidrometalúrgico, el cual consiste esencialmente en una sucesión de separaciones sólido-líquido. De esta manera se somete a los materiales a una operación de lixiviación, normalmente mediante un ácido o bien a veces con un alcalino. La lixiviación dispondrá ciertos elementos en disolución y otros los mantendrá insolubles, los cuales se filtrarán posteriormente. La torta del filtro probablemente se deberá volver a lavar con el objetivo de liberarla de impurezas indeseadas, como es el caso de ciertos componentes insolubles que cristalizan y permanecen en la parte insoluble hasta que desaparecen al limpiar. La disolución normalmente debe purificarse mediante la adición de polvo de zinc o de aluminio, o bien cambiando el pH o la temperatura. A continuación se filtra el precipitado [22].

Según un estudio alemán [21], el proceso de reciclaje de los RAEE ideal podría iniciarse con métodos mecánicos para desarrollar la trituración y la clasificación de las diferentes fracciones, seguido de una extracción de metales por el método hidrometalúrgico. Aparte de estas soluciones, los metales se pueden aislar mientras los medios de extracción se regeneran para su posterior uso. Los residuos de la lixiviación pueden clasificarse en plásticos libres de metal, óxidos refractarios y cristales. En este mismo estudio se añade que la combinación del proceso de lixiviación junto a un tratamiento térmico minimiza con éxito el residuo resultante, un 35% en peso, en comparación con el de lixiviación aislado, un 72% en peso, o con el tratamiento térmico, un 67% en peso.

A continuación, en la Figura 8.3.1, se exponen los pasos a seguir, explicados anteriormente, para conseguir un tratamiento medioambientalmente correcto de los RAEE.



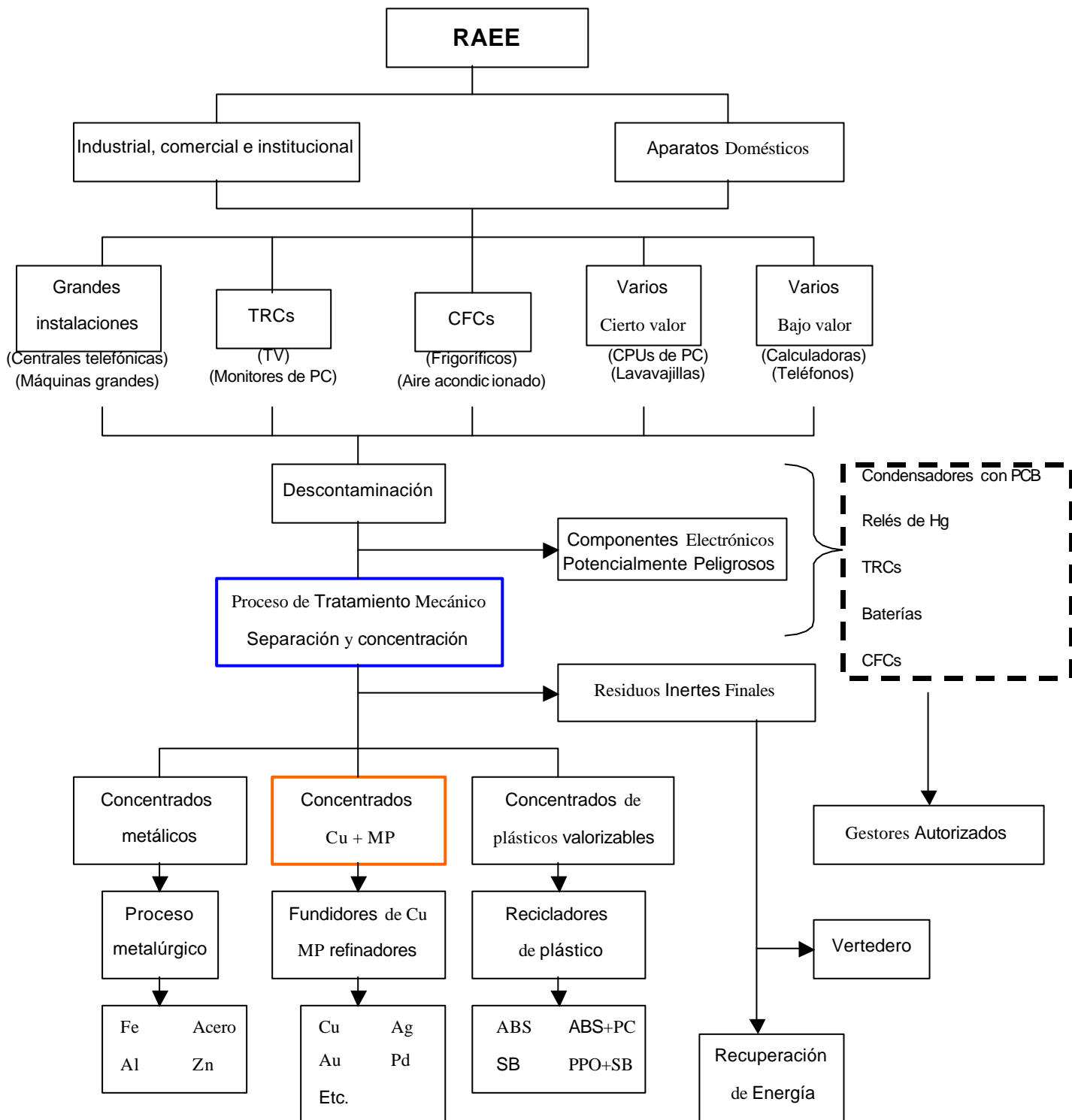


Figura 8.3.1

Ciclo general del reciclado de los RAEE



Como se puede observar en la figura anterior, Figura 8.3.1, después de descontaminar los residuos, se somete a éstos a un seguido de operaciones mecánicas para separarlos y clasificarlos en diversas fracciones. Como detalle de estas operaciones, se adjunta la siguiente Figura 8.3.2, donde la parte en azul corresponde a la fase señalada con el mismo color en la Figura 8.3.1.

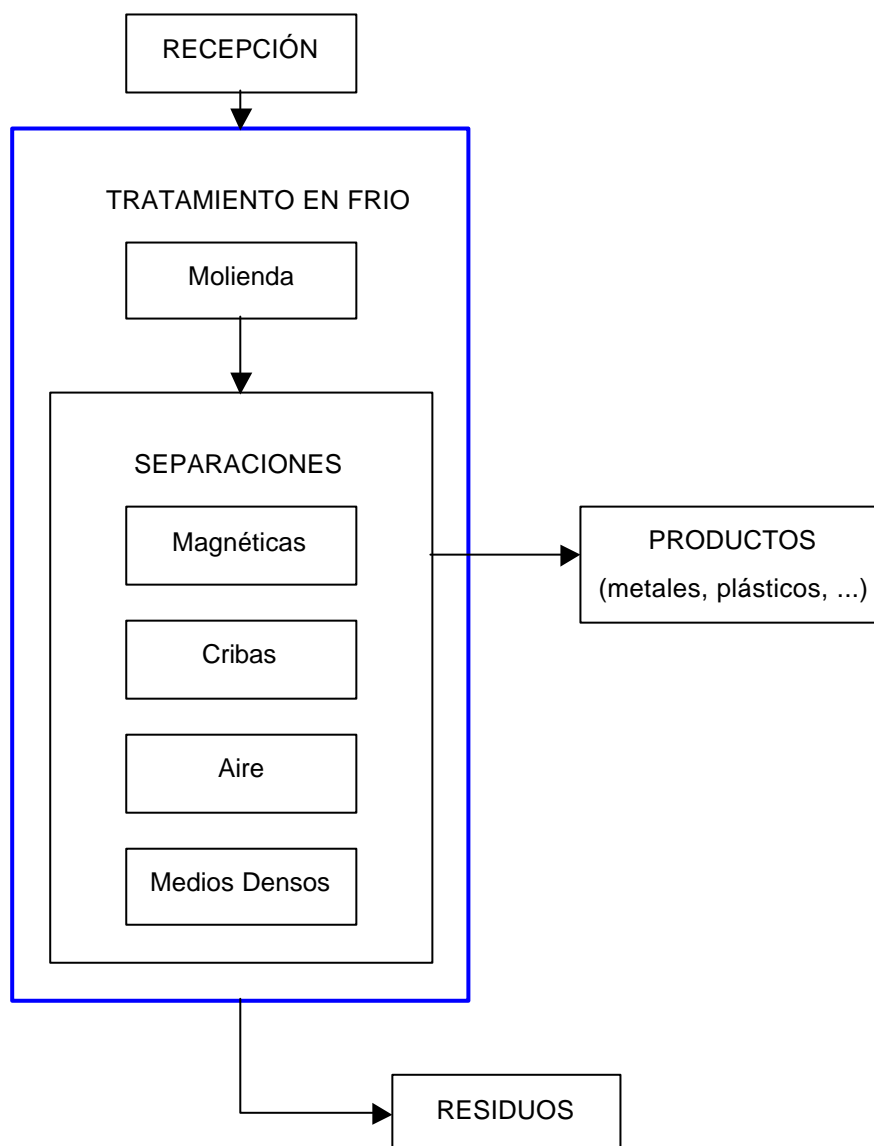


Figura 8.3.2 Detalle del proceso de tratamiento mecánico y separación en diversas fracciones

Una vez obtenidas las diferentes fracciones de productos, se procederá al refinado y reciclado de cada una de ellas. Tradicionalmente los metales preciosos (MP) han sido los productos más recuperados a partir de los RAEE, debido, sobretodo, a su elevado valor y



su gran campo de aplicación en los equipos electrónicos y eléctricos. A continuación se esquematiza, en la Figura 8.3.3, el proceso general de recuperación de los MP, donde la parte en anaranjada corresponde a la fase señalada con el mismo color en la Figura 8.3.1.

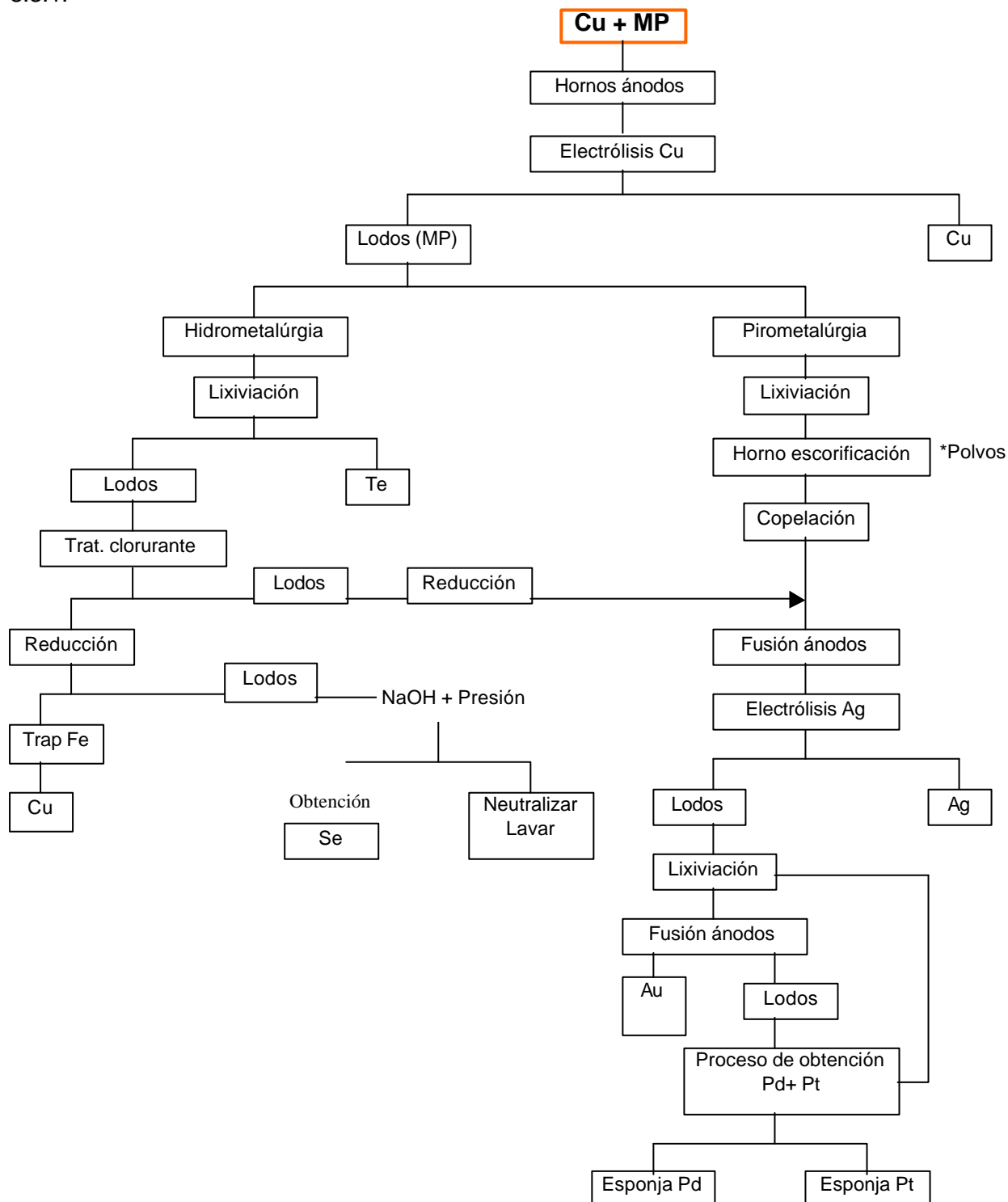


Figura 8.3.3

Ciclo general del proceso de recuperación del Cu y los MP



9. Análisis de los sectores industriales implicados

Realizando una revisión de los diferentes análisis tecnológicos desarrollados a escala de la Unión Europea, en general se puede observar que las técnicas de pretratamiento aplicadas a los RAEE pueden ser:

- Desensamblaje no destructivo.
- Desensamblaje parcialmente destructivo.
- Tratamiento completamente destructivo.

El aspecto clave es la determinación de las diferentes opciones de los siguientes procesos de tratamiento de los RAEE incluyendo los impactos tanto económicos como medioambientales de la cadena completa de gestión de RAEE después de la recogida.

Existe un amplio consenso sobre que el punto de arranque para la cadena de gestión post-recogida de los residuos de EEE serán los llamados centros de procesado de RAEE. Estos serán operados por actores industriales con la visión de tratar y desmontar los RAEE en elementos estructurales para ser reutilizados, reciclados o eliminados.

El tipo de elementos estructurales en que se desmontan los RAEE dependen del contenido de elementos peligrosos de los distintos componentes, del valor de mercado para su reutilización, y de las opciones de reciclaje y eliminación disponibles, las cuales a menudo dependen de las condiciones locales.

Por el momento el trabajo de desmontaje se está llevando a cabo básicamente de forma manual. Sin embargo, se espera que en el futuro la automatización y la robotización vayan a ser gradualmente introducidos como resultado en el progreso en el diseño para el reciclaje.

Las dos grandes alternativas de tratamiento y procesado son del tipo “desmontaje + reutilización de componentes” versus “fragmentación / fusión / incineración para la recuperación de metales / energía”.

Las cuestiones clave dentro de estas estrategias están en torno al nivel de desmontaje óptimo previo a la fragmentación y respecto a la aceptabilidad de las consecuencias medioambientales derivadas de la recuperación de energía y fusión de los metales.

Dada la gran variedad de los RAEE se va a realizar un estudio independiente para cada sector generador de residuos.



9.1. Electrodomésticos grandes

La cuestión sobre si los electrodomésticos grandes (línea blanca fundamentalmente como son lavadoras, secadoras, lavavajillas, centrifugas, hornos, lavadoras/centrifugadoras combinadas) deben de ser procesadas en las plantas de fragmentación de coches existentes o en fragmentadoras especiales para electrodomésticos ha sido investigada sistemáticamente en Alemania, Austria y Holanda. De acuerdo con un estudio holandés [23], en el caso de utilizar fragmentadoras de coches, el pretratamiento necesario se limita a desmontar los condensadores que contienen PCB, con el fin de evitar la contaminación de la fracción ligera de fragmentación. Este estudio holandés encontró que el 12,6% de todos los electrodomésticos grandes contienen condensadores con PCB. Basándose en el hecho de que los condensadores fabricados después de 1984 están libres de PCBs, el estudio calcula que residuos de EEE sospechosos de contener PCBs representarán una preocupación hasta aproximadamente el año 2015. Antes de esta fecha los condensadores deberán ser separados y se deberá controlar si contienen PCB. Por otro lado, las fragmentadoras de electrodomésticos exigen un desmontaje completo de componentes tales como tambores, motores eléctricos, contrapesos, condensadores, plásticos, relojes, etc., antes de pasar a la fragmentación. Este desmontaje puede obligar a la necesidad de reciclar los plásticos contenidos en los electrodomésticos, lo cual resulta un punto importante dado que los electrodomésticos cada vez contienen más plástico.

Las experiencias operacionales disponibles muestran unas posibilidades de reciclaje de materiales de alrededor de un 90% por electrodoméstico en el caso de fragmentadoras para electrodomésticos a un coste sustancialmente superior en comparación con las fragmentadoras de coches donde se puede conseguir un reciclaje del material de un 75%. A pesar de las ventajas económicas que presentan las fragmentadoras de coches, las experiencias realizadas han mostrado que el tratamiento combinado de coches y electrodomésticos afecta negativamente a la separación global del material y aumenta la cantidad de residuo de fragmentación que tiene que ser depositado en vertederos.

Respecto al tema de los frigoríficos y congeladores en su fin de vida, la mejor información disponible procede de Alemania, donde existe una capacidad de reciclaje de 3,2 millones de unidades/año regularmente distribuida por todo el territorio. Previamente al reciclaje de los materiales contenidos en estos aparatos hay que proceder al drenaje de todos los refrigerantes que contienen CFCs. Tras la operación de fragmentación, el residuo ligero proviene del poliuretano de aislamiento que contiene todavía cantidades apreciables de CFCs, que pueden ser drenadas posteriormente aplicando técnicas químicas, como por



ejemplo la desgasificación. El residuo ligero de poliuretano que contiene más de un 0,5% de CFCs no puede ser reciclado y se envía a las incineradoras municipales.

9.2. Pequeños electrodomésticos

Un estudio alemán exploró las posibilidades de tratamiento para los electrodomésticos pequeños que normalmente acaban en la bolsa de la basura. En dicho informe se concluyó que alrededor de un 20% de estos aparatos contienen sustancias peligrosas en cantidades significativas [23]. El estudio encontró que el 59% de los RAEE pequeños están formados por metales (38% Fe y 21% no-Fe) que pueden ser recuperados mediante técnicas de procesamiento mecánico y posteriores tratamientos en procesos metalúrgicos. En relación al 41% restante no metálico, los principales componentes son plásticos mezclados, textiles, madera y vidrio. El estudio concluye que no existe ninguna opción de reciclaje debido al alto nivel de contaminación que presenta (compuestos orgánicos bromados, PCB, Hg, Cd, Pb, Ni). El estudio sugiere optar por la recuperación energética para la parte de esta fracción que pueda ser descontaminada y la eliminación final para el resto del material.

9.2.1. Reciclado de teléfonos móviles

Los tipos de residuos que generan los móviles pueden clasificarse en baterías, que pueden ser terminales ión de litio (Li-on), las de níquel y cadmio (Ni-Cd) y las de hidruro metálico de níquel (NiMH)), en terminales (carcasas de plástico y placas de circuitos impresos) y en accesorios (los cargadores, el teclado, la antena, etc.). El proceso de recuperación de estos componentes, según el procedimiento seguido por la empresa vasca Indumetal Recycling, consiste de tres fases: descontaminación, trituración y posterior venta. Las baterías de los teléfonos son elementos considerados peligrosos y perjudiciales, por lo que se deben separar manualmente y enviarlas a un gestor específico. En la primera fase las baterías se extraen del aparato telefónico y son clasificadas según su composición para remitirlas a un gestor autorizado de residuos peligrosos. De la misma manera, las pantallas de cristal líquido (LCD) tienen que desmontarse manualmente para tratarlas.

El resto se somete a un proceso específico de trituración a través de diversos molinos con el objetivo de liberar los distintos componentes. Después, por un sistema de concentración y separación, se recuperan los distintos tipos de materiales que componen los teléfonos móviles para luego enviarlos a un tratador final que se encargará de su reincorporación en la cadena de producción.

Los componentes metálicos son recuperados tras la trituración a la que son sometidos. Se pueden recuperar los distintos metales y el plástico que contiene la carcasa del



celular. Gracias a este proceso, el 92,5% del teléfono es recuperado y reciclado y sólo resta un residuo final compuesto de caucho y polímeros. Con este proceso, todos los elementos obtenidos mediante el reciclaje son utilizados como materia prima de la industria, con el consiguiente ahorro de recursos naturales.

Por otra parte, el proyecto ECTEL [24] procedió en primer lugar a realizar un esfuerzo para evaluar la opción de “fragmentación + fusión para la recuperación de metales” versus “desmontaje y reutilización de componentes”. El estudio concluye que la mejor opción desde el punto de vista medioambiental es el desmontaje y la reutilización de componentes, sin embargo, alerta sobre que la adopción de esta opción puede no ser sostenible en el futuro, para el caso de los teléfonos móviles, debido a que la creciente sofisticación tecnológica puede dejar obsoletos a los componentes antes de que puedan ser reutilizados.

9.2.2. Campaña de recogida de móviles en España

Se estima que en España hay alrededor de 20 millones de teléfonos móviles, y 3 millones de estos aparatos se consideran ya obsoletos [25]. Ante la cantidad de residuos que los móviles pueden generar, el Ministerio de Medio Ambiente y ASIMELEC (Asociación Multisectorial de Empresas Españolas de Electrónica) desarrollaron un proyecto conjunto para incrementar la recogida de teléfonos móviles. Durante julio y diciembre del 2001, se puso en marcha la Campaña de Recogida de Móviles y Reciclaje de Teléfonos Móviles, conocida con el nombre de “El Tragamóvil”, en poblaciones españolas de más de 50.000 habitantes. Se instalaron cerca de 300 puntos de entrega y recogida en establecimientos y servicios técnicos para concienciar a los ciudadanos de la necesidad de recoger y reciclar este tipo de residuos, que se incrementa sin cesar, con el fin de ahorrar materias primas y recursos naturales. La campaña tuvo como precedente la experiencia piloto de Recogida y Reciclaje de Teléfonos Móviles realizada en la comunidad de Madrid entre los meses de enero y junio del 2001, en la que se recogieron y reciclaron 7 toneladas de residuos de telefonía móvil. A pesar de que los resultados del primer año de la campaña nacional fueron espectaculares, ya que se recogieron 50 toneladas de residuos, siete de cada diez móviles no fueron reciclados.

Tras la entrega del móvil en un punto de recogida, éste se transporta a una planta de reciclaje de la empresa Indumetal Recycling ubicada en Vizcaya, donde se le extrae la batería, que se traslada a un gestor autorizado de residuos peligrosos. Allí también se separan los materiales plásticos y metálicos, y después de ser triturados, se reutilizan para fabricar otros teléfonos o para obtener materias electrónicas. Esta campaña antecede al Plan Nacional de Residuos Electrónicos y Eléctricos que está pendiente de tramitación.



ANIEL (Asociación Española de Industrias Electrónicas y de Telecomunicaciones) también ha puesto en marcha un sistema de recogida de móviles, distribuyendo en los centros de servicios de telecomunicaciones unos contenedores, acompañados de unos folletos informativos donde se anima al usuario a reciclar su móvil. En esta campaña han colaborado los principales fabricantes, tales como Ericsson, Motorola, Siemens, y los operadores de telefonía móvil, como Telefónica, Vodafone y Amena. La previsión era que durante el año 2002 se reciclaran dos millones de unidades para alcanzar en el 2003 los cuatro millones de unidades recuperadas y recicladas.

9.3. Aparatos con pantallas

La actual falta de un flujo estable de TRCs (Tubos de Rayos Catódicos), debido a que no existen actividades de recogida sistemáticas de este tipo de aparatos a escala europea, parece ser el mayor impedimento para el desarrollo de plantas de reciclaje apropiados a gran escala. Se estima que la producción anual de TRCs en Europa es del orden de 606.000 toneladas y que se importan además unas 80.000 toneladas [26].

Se han ensayado algunas posibles soluciones para la gestión de TRCs que contienen plomo en Alemania, Austria y Holanda. Las soluciones consideradas de futuro pueden ser las siguientes:

- Reciclaje para la fabricación de nuevos TRCs.
- Reciclaje para aplicaciones del vidrio o de la cerámica.
- Utilización de los TRCs como agente fundente en las fundiciones de plomo.

Se presentan serias barreras de tipo técnico y económico en el reciclaje para la producción de TRCs nuevos, lo que hace que el porcentaje de TRC reciclable se sitúe en un 55% mientras que el 45% restante debe de ser enviado a la industria cerámica.

Se estima que a nivel europeo se podría conseguir establecer el potencial de reciclaje de los TRCs en 88.000 t/año (la producción total de vidrio del cono es de 176.000 t/año). La evaluación del potencial de reciclaje de TRCs en fundiciones de cobre y plomo da como resultado un orden de 6.000 t/año.

9.4. Tarjetas de circuitos impresos

Las tarjetas de circuitos impresos son difíciles de reciclar debido principalmente a su contenido en materiales plásticos y en particular de aquellos que contienen retardantes de llama bromados.



Las tarjetas de circuitos impresos se construyen a base de plásticos (resinas) termoestables con fibra de vidrio como material esquelético y provistos de aditivos pirorretardantes. Diferentes componentes eléctricos tales como semiconductores, resistores, condensadores, chips, etc. se montan sobre las tarjetas y se interconectan mediante soldadura de plomo y otros metales pesados, es lo que se conoce por Printed Wiring Boards (PWBs). Los metales como el Cu, Ag, Au, Pd y Pt se recuperan en fundiciones de metales. El contenido en peso de plomo de las tarjetas es de un 0,14% para un circuito con mucha densidad y de alrededor de un 0,1% para un convertidor completo.

Uno de los métodos de reciclado utilizados es la pirolización, donde la resina termoestable se descompone térmicamente, sin embargo los productos generados en la combustión pueden ser complicados y críticos de controlar. Este proceso requiere de sistemas de filtrado y tratamiento para las emisiones atmosféricas sofisticados y costosos.

Se ha llevado a cabo un proyecto de carácter multinacional (Intelligent Manufacturing Systems) financiado por el Programa Competitive and Sustainable GROWTH de la Unión Europea con el que se ha pretendido desarrollar una tecnología innovadora que incluye, en primer lugar, la etapa de separación y recuperación de componentes válidos para su reutilización y en segundo lugar, el tratamiento de los materiales que constituyen las tarjetas de circuitos impresos utilizadas en ordenadores, teléfonos, televisores, etc. para su posterior reciclado [27]. La gran cantidad de pequeñas piezas, componentes, soldadura y materiales utilizados en su fabricación, dificultan enormemente la separación, el reciclado y reutilización de las mismas.

Este proyecto tiene como objetivo principal la sustitución del plomo, tradicionalmente considerado como sustancia peligrosa y limitado por la actual Directiva europea, que se viene utilizando como componente de la soldadura en la fabricación de tarjetas de circuitos impresos, por otros materiales menos perjudiciales para el medio ambiente como las aleaciones de estaño, plata y cobre y minimizar de forma sustancial su repercusión medioambiental y sobre la salud humana.

La importancia económica del reciclado de los materiales preciosos (oro, plata, platino, etc) utilizados en la fabricación de tarjetas de circuitos impresos, el volumen del vertido en el estado español cercano a las 200.000 toneladas durante el año 2000 y que en Europa alcanzará la cifra de 7,4 millones de toneladas en el año 2004, justifica la importante participación internacional en la realización del mismo.

El proyecto se ha desarrollado a través de un importante consorcio internacional formado por empresas, centros de investigación y universidades pertenecientes a países



Europeos, así como Japón y Corea. Entre los participantes destacan Philips, Thomson, la Universidad Técnica de Berlín, Promosol, AB Mikroelektronik GmbH e Indumetal Recycling, como entidades de Japón (Hitachi, Oki Electronics, Fujitsu, Universidad de Tohoku, Universidad de Tokio, Universidad de Osaka y la Universidad de Juntendo), y de Corea (LG, Eco Join, KITECH y Jaenung Coll). El proyecto se ha llevado a cabo a lo largo del periodo 1999-2002.

9.5. Metales preciosos

Los metales preciosos (MP), como el oro y la plata, y los metales del grupo del platino (MGP), como el platino, paladio, rutenio, iridio, osmio y rutenio, juegan un papel clave en las industrias eléctricas y electrónicas. El reciclaje de estos materiales tiene un impacto significativo en las cantidades que deben ser importadas cada año. Por ejemplo, aproximadamente el 25% de la demanda total de MP de todos los usos industriales se encuentra en material reciclado.

Los MP son esenciales en aplicaciones electrónicas y eléctricas a causa de su baja resistencia de contacto y de su buena resistencia a la corrosión y a la oxidación. Esto, junto a su alto valor en el mercado, los hace susceptibles de ser recuperados a partir de los residuos que los contienen y es por este motivo por el que se han desarrollado gran cantidad de procesos y tratamientos para su recuperación.

Los pasos típicos del proceso para la recuperación de MP a partir de RAEE incluyen el desmontaje manual o una preparación mecánica seguida de una incineración, una separación y una clasificación. La recuperación final normalmente se lleva a cabo mediante un proceso de lixiviación y precipitación seguida de una fundición en flujo, un refinado y una fundición. La pureza final y los usos de los materiales reciclados son comparables a la de los producidos a partir del mineral virgen.

9.5.1. Naturaleza y cantidad

Los MP están contenidos en platings de varios grosores, puntos de contacto de relés, contactos de interruptor, cables, soldaduras, transistores, placas de circuitos impresos, baterías y termopares. Los MP pueden estar en forma de aleación, o bien forma casi pura; sin embargo, los RAEE suelen contener solamente una pequeña parte de MP. Se pensaba que a partir de los años 60 el contenido de MP en las piezas individuales de AEE descendería; sin embargo, el número total de piezas ha incrementado al igual que lo ha hecho también la demanda de metales preciosos en la industria electrónica. En la siguiente Tabla 9.5.1.1 se detallan las estimaciones sobre la cantidad común de MP en los RAEE [28].



	Libra de 12 onzas/tonelada de RAEE	Gramos/tonelada de RAEE
Oro	2-10	750-3700
Plata	40-100	15000-37000
MGP	>1	>370

Tabla 9.5.1.1 Cantidades de metales preciosos (MP) presentes en los RAEE

La composición en peso aproximada de RAEE procesados a mediados de los años 80 era del 30% de plásticos, el 30% de óxidos refractarios, el 40% de metales no preciosos incluyendo cobre, hierro, níquel, estaño, plomo aluminio y zinc y el 0,305% de metales preciosos. La Tabla 9.5.1.2 muestra las cantidades consumidas de metales preciosos por las industrias fabricantes de AEE [28].

Consumo estimado en miles de gramos		
Metal	Año 1986	Año 2000
Oro	399.110	932.500
Plata	644.700	11.563.000
Platino	27.975	55.950
Paladio	93.250	167.850
Rodio	2.990	4.480
Iridio	375	1.120
Rutenio	26.485	37.300
Osmio	375	375
TOTAL	1.195.260	12.762.575

Tabla 9.5.1.2 Consumo estimado de MP por la industria fabricante de AEE

9.5.2. Opciones preliminares del proceso de recuperación

Típicamente, se utilizan varias técnicas para liberar los metales preciosos o para concentrarlos. La regla general es que a mayor concentración de metales preciosos en el residuo, mayor es la ganancia económica. Las tecnologías utilizadas para recuperar estos metales a partir de RAEE incluyen el desmantelamiento manual y segregación, proceso mecánico para mejorar el residuo y varios tratamientos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos o electrometalúrgicos con el objetivo de concentrar o recuperar los MP. En la siguiente Tabla 9.5.2.1 se detallan las características de estos procesos [28].



Proceso	Comentarios
Extracción química	Solamente de uso en superficies de oro descubiertas. Recuperación ~ 90%
Tratamiento químico (disolución ácida)	Requiere ácidos agresivos. El material encapsulado en cerámico no se recupera. Produce grandes volúmenes de efluente de metal base.
Granulación y separación física	Los MP de residuo mezclado se dispersan en todas las fracciones, aunque la mayor parte se concentra en dos fracciones. Recuperaciones ~ 80%
Quemado y fusión (previo desmantelamiento mecánico manual)	Adecuado para todos los residuos. Recuperaciones cercanas al 85%

Tabla 9.5.2.1 Opciones de proceso de reciclaje de los MP en los RAEE

Como consecuencia de la complejidad de las operaciones de recuperación, existen numerosos pasos a seguir hasta converger en el proceso de refinado, usualmente llevado a cabo por diferentes compañías, teniendo en cuenta que cada paso que se realiza añade mayor coste al metal refinado.

En la siguiente Figura 9.5.2.1 se muestran posibles opciones de recuperación de MP para RAEE. No todas las opciones se usan para cada tipo de residuos, y en algunos casos se requieren pasos adicionales. Por ejemplo, el MP precipitado está normalmente tan finamente dividido que se necesita líquido fundición en flujo antes de refinar y fundir.



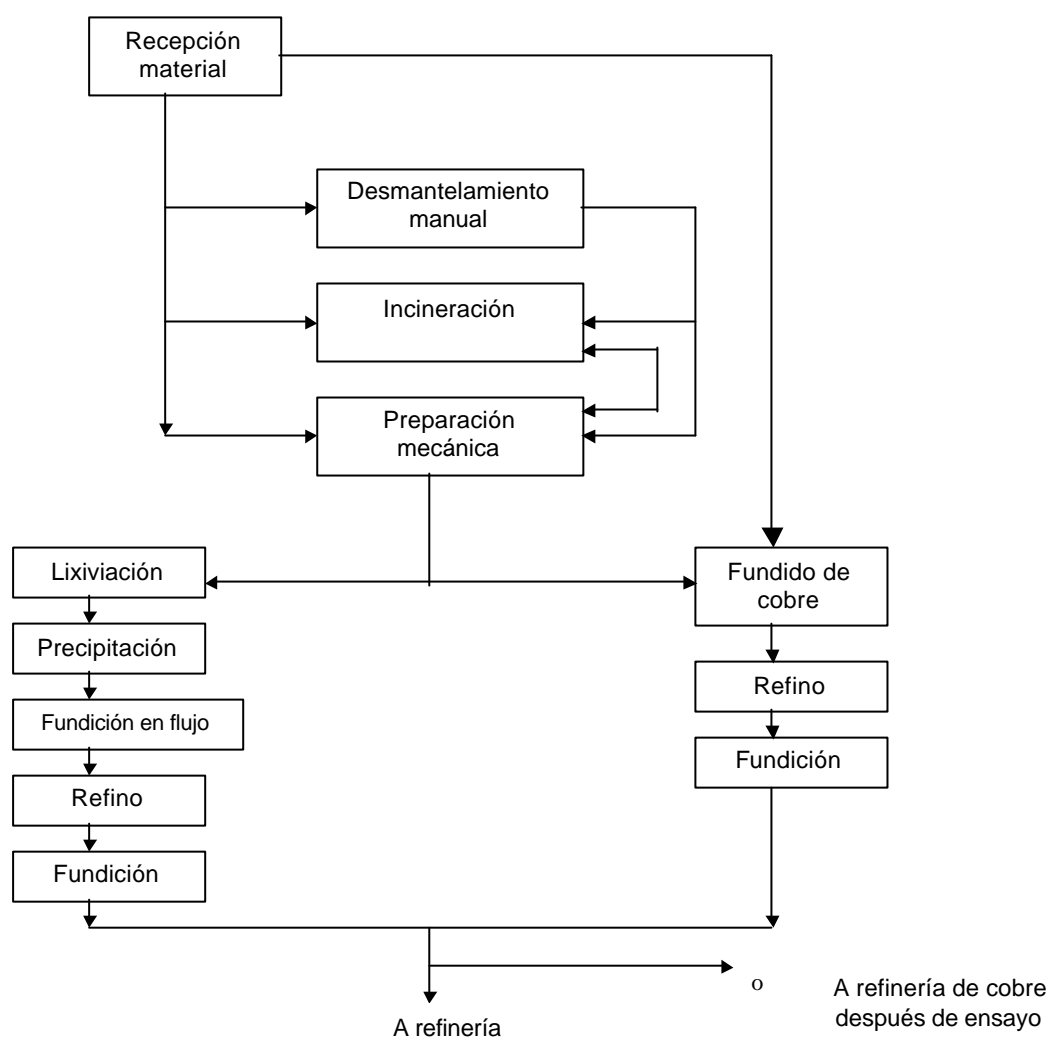


Figura 9.5.2.1 Posibles opciones de recuperación de MP para RAEE

En la mayoría de los casos, el desmantelamiento inicial consiste en cortar conectores, sacar placas de circuitos impresos, buses, y demás. Las otras partes que no contienen materiales preciosos, separadas durante este desmontaje manual inicial, normalmente pueden generar renta suficiente como pagar este paso del proceso. Las fracciones típicamente separadas por el desmontaje son hierro, aluminio, hilo de cobre y sólidos, mezcla de partes rotos, materiales que contienen metales preciosos y piezas reutilizables.

Las operaciones mecánicas típicas en este proceso de reciclaje suelen ser la molienda con martillos, la clasificación por aire, la separación magnética, la mampara vibratoria, la pantalla separadora de cables, la separación por corrientes turbulentas (eddy) y la separación por alta tensión. Las grandes cantidades de oro y de plata y de los metales



del grupo del platino están siempre concentradas en el producto de metal de alta tensión. El proceso mecánico y el desmantelamiento manual puede reducir enormemente los costes de envío y tributos de refinamiento, eliminando la mayoría de los materiales extraños.

El material concentrado de MP puede ser procesado por semirrefinadores, los cuales recolectan el material tras el desmontaje inicial y procesan más adelante. Estas empresas pueden limpiar químicamente los plásticos de las placas de circuitos impresos, o incinerarlos a temperaturas de entre 400 y 500 °C, seguido de un troceado o desmenuzado de los componentes. Un paso adicional puede incluir la pulverización de condensadores para dejar una pasta, que contenga los metales preciosos, y fundir los materiales en barras para su envío a las refinерías. Otro procedimiento consiste en incinerar plásticos y otros elementos orgánicos, seguido de una lixiviación cáustica del residuo con NaOH para eliminar el aluminio, y finalizando con su fusión para producir un producto homogéneo. Un análisis típico de los lingotes resultantes mostraba que estaban compuestos por un 85% de Cu, un 4% de Fe, 0,2% Al, 9.440 g/t de plata y 740 g/t de oro [28]. A estos lingotes se les puede realizar un electrorefinado para llevar a cabo la recuperación del cobre presente, y los metales preciosos, los cuales se concentran en las impurezas del ánodo, pueden procesarse para su reconversión en una refinерía de MP.

Otro enfoque en la separación de metales, novedoso pero también costoso, propone evitar cualquier proceso mecánico o desmantelamiento / segregación manual mientras aún se esté concentrando los metales preciosos. Este proceso implica extraer el aluminio del resto de residuo mediante la aplicación de calor. Tanto el cobre como los MP se disuelven en el lingote debido a su alta insolubilidad en el aluminio fundido. Finalmente el lingote de aluminio se refina en una celda de electrorefinado de tres capas, donde los MP se concentran en el metal del ánodo.

Todavía existe otro proceso que implica una separación manual para extraer carcasas voluminosas de aluminio, un posterior desmenuzado y una separación magnética, seguido de una incineración y fundición del material permanente para formar un lingote frágil. Este procedimiento se ha usado en conjuntos parciales, pins y conectores. El lingote, consistente en aluminio, cobre, hierro, manganeso, níquel, zinc y metales preciosos, es prensado y el material se agita con una solución de sulfato de cobre acidificada para conseguir la cementación del cobre. La fracción de hierro del material desmenuzado se utiliza como agente cementante. El precipitado de cemento de cobre contiene más del 90% de los metales preciosos ya que un análisis del precipitado típico tras la cementación muestra que la composición consta de 89% de Cu, 1,1% de Fe, 0,32% de Pb, 0,36% de Sn, 1,5% de insolubles, 113 g/t de oro y 325 g/t de plata [28]. Tras fundir y separar el producto de la cementación en un ánodo, a éste se puede realizar un



electrorefinado, donde el metal del ánodo contendrá a los MP listos para enviar a la refinería.

9.5.3. Opciones para el proceso final de recuperación

La recuperación final de los MP depende de la forma física, composición, grado y metales asociados en el concentrado. En general, la mayoría de refinadores se especializan en la recuperación de MP de ciertos tipos de residuos. De todas las opciones de recuperación de MP para los RAEE, los más efectivos parecen ser el quemado y fusión.

A diferencia de la mayoría de los residuos metálicos, los cuales normalmente se identifican, se separan y se refunden (a menudo conteniendo algunos elementos traza), el reciclado de los MP es inusual, ya que su reproceso se desarrolla en materiales extremadamente puros. Por ejemplo, el oro refinado químicamente a partir de residuos presenta un grado de pureza del 99,95%, mientras que el rango de pureza para un oro electrolítico es de 99,97-99,99%. La plata es típicamente pura en un 99,99% y los MGP lo son en un 99,5%.

Tras el refinado es imposible asegurar si los MP han sido extraídos directamente del mineral o recuperados de placas de circuitos integrados.

9.5.4. Futuras tendencias

La rápida evolución de la industria electrónica ha conducido a la mejora continua en la eficiencia de uso de los metales preciosos. Por ejemplo, el paladio se usó durante muchos años en mecanismos de conmutación para teléfonos; sin embargo, este uso está en decadencia debido a la rápida introducción de los interruptores en estado sólido. Además, las aleaciones paladio-plata, las cuales son más económicas, están reemplazando al paladio puro, utilizado anteriormente. A pesar de ello, el cambio de uso de interruptores mecánicos a interruptores en estado sólido ha incrementado en general la demanda de MGP ya que se emplean como contacto entre el circuito y la carcasa exterior. De hecho, el 50% de los MGP y el oro utilizados en las industrias electrónicas va dispuesto en algún tipo de contacto. Las incrustaciones de oro y de otras aleaciones del mismo están siendo utilizadas de manera creciente debido a que son una alternativa económica y fidedigna al uso de oro electrodepositado. Otro cambio en la industria es el reemplazamiento del oro en las placas de circuitos impresos y en los conectores de límite por paladio.

La cantidad actual de MP contenidos en un elemento individual disminuirá, por ejemplo, al mismo ritmo que decrezca el grosor de la capa de oro utilizado hasta un límite más bajo definido por la fiabilidad, y aumenten las posibilidades para depositar cualquier metal



precioso en un área más pequeña y bien definida. Esto presentará nuevos desafíos en la industria del reciclaje debido a la necesidad de desarrollar nuevas técnicas para la recuperación de los MP contenidos en los residuos.

9.6. Materiales plásticos

De acuerdo con un informe de la Asociación Europea de Fabricantes de Plásticos APME [29], el contenido medio de plástico en los RAEE, teniendo en cuenta también los cables, en el año 1999 en Europa occidental representó un 13% del peso total, es decir, aproximadamente unas 840.000 toneladas de residuos plásticos.

Los materiales plásticos se obtienen por procesos de síntesis química, polimerización y policondensación, la mayoría a partir de derivados de naftas. Los elementos químicos que los componen, su configuración y la longitud de la cadena molecular, condicionan sus propiedades físico-químicas, las cuales a su vez determinan las características de procesamiento para su moldeado (transformado a piezas) y sus prestaciones.

Técnicamente los materiales plásticos se dividen en dos grandes familias:

- Termoestables: son cadenas entreligadas químicamente, lo que comporta que las piezas, una vez moldeadas, no se puedan modificar sin destruir la estructura molecular con la consiguiente alteración de propiedades. De aquí que su reciclado quede limitado a su molturación e incorporación a nuevas masas de materiales, aunque existen determinados materiales plásticos termoestables, como por ejemplo el poliuretano, al cual se le pueden aplicar métodos de reciclado químicos. Los plásticos termoestables se consideran potencialmente reciclables mecánicamente.
- Termoplásticos: son cadenas libres que a temperatura ambiente se presentan en estado sólido, funden por calor y por tanto se pueden moldear repetidas veces. Por este motivo pueden ser fácilmente reciclables. No obstante, según la aplicación que se les da y las condiciones de reprocesado, van sufriendo ligeras alteraciones que conllevan la modificación de sus propiedades, por lo que deben desecharse después de 5-7 ciclos de procesamiento. Una característica inherente a su estructura química es la poca compatibilidad entre productos de diferentes familias por la baja solubilidad de un polímero en otro o por sus aditivos, quedando rebajadas las propiedades mecánicas de las mezclas respecto de las de los materiales homogéneos.

Entre los polímeros más frecuentes cabe destacar los estirénicos como el ABS (acrilnitrilo butadieno estireno) o el HIPS (poliestireno de alto impacto), las poliolefinas como el



HDPE (polietileno de alta densidad) o el PP (polipropileno), y el PVC (policloruro de vinilo).

Son muy pocos los polímeros básicos (conocidos también como resinas) que se utilizan o procesan sin mezclar; la mayoría de los plásticos son mezclas de polímeros y aditivos formuladas para que tengan exactamente las propiedades que se requieren para una aplicación concreta. A continuación se detalla en la Tabla 9.6.1 los aditivos más usuales presentes en los materiales plásticos [30].

Material	Grado de concentración
Antioxidantes	Hasta el 11%
Sustancias para rellenar	Hasta el 40%
Agentes espumantes	Hasta el 2%
Intensificadores de la resistencia al impacto/endurecedores	Hasta el 10%
Pigmentos y tintes	Hasta el 5%
Plastificantes	Hasta el 40%
Termoestabilizantes o fotoestabilizantes	Hasta el 5%
Piroretardantes	Hasta el 15%

Tabla 9.6.1 Aditivos plásticos más frecuentes

Para el final de la vida útil de los RAEE será preciso contar con tecnologías capaces de realizar una rápida identificación y clasificación automática de los plásticos, en función del tipo de polímero, de los aditivos (halogenados u otros alternativos), metales pesados, pigmentos y cargas, de manera que su proceso de reciclado sea controlado con garantía de calidad y económicamente viable.

En la siguiente Tabla 9.6.2 se muestran los diversos aditivos como pigmentos, ignifugantes y colorantes que suelen incorporar los plásticos, sobre los cuales hay que aplicar notables esfuerzos de identificación con el fin de obtener fracciones homogéneas y reciclables [31].



Polímeros	PS, ABS, SB o HIPS PC, ABS+PC PPE, PPE+SV o PPOm, PPE+PA PVC PP/PE SAN, PET/PBT, POM, PMMA, PA...								
Cargas, refuerzos	Calcita, barita, talco, sílice Fibra de vidrio								
Aditivos ignifugantes	<table> <tr> <td>Bromados</td><td>BDPEs (Polibromo difenil éteres) TBBPA (tetrabromobisfenol A derivados) PBBs (bifenilos polibromados)</td></tr> <tr> <td>Clorados</td><td>Parafinas cloradas</td></tr> <tr> <td>Fosforados</td><td>Polifosfatos y organofosfatos</td></tr> <tr> <td>Metálicos</td><td>Compuestos de Al y/o Mg</td></tr> </table>	Bromados	BDPEs (Polibromo difenil éteres) TBBPA (tetrabromobisfenol A derivados) PBBs (bifenilos polibromados)	Clorados	Parafinas cloradas	Fosforados	Polifosfatos y organofosfatos	Metálicos	Compuestos de Al y/o Mg
Bromados	BDPEs (Polibromo difenil éteres) TBBPA (tetrabromobisfenol A derivados) PBBs (bifenilos polibromados)								
Clorados	Parafinas cloradas								
Fosforados	Polifosfatos y organofosfatos								
Metálicos	Compuestos de Al y/o Mg								

Tabla 9.6.2 Polímeros y aditivos más frecuentes en el sector de los AEE

A continuación se representa en la Tabla 9.6.3 los tipos de ignifugantes utilizados y sus porcentajes respectivos empleados en los AEE durante el año 1995 en Europa occidental [31].

Ignifugantes halogenados		Ignifugantes fosforados	Otros ignifugantes	Aplicaciones
Bromados	Clorados			
83%	12%	5%		Equipos de línea marrón: TV
83%	13%	4%		Equipos de procesado de datos
54%	-	40%	6%	Material AEE

Tabla 9.6.3 Porcentaje de ignifugantes empleados en el sector de AEE en Europa occidental en 1995

A partir de la reglamentación de la gestión de los RAEE, despiezando estos aparatos e identificando los materiales plásticos, se podrá recuperar una parte de los materiales que se hallen en buen estado (PS, ABS, PVC, PP). Éstos son apreciados, no por la cantidad (5-6% de todo el plástico recuperado), sino por su valor alto en el mercado. Los plásticos procedentes de los RAEE junto con los materiales que se recuperan en el sector de la automoción y el industrial tienen su mercado en piezas técnicas.

En la siguiente Figura 9.6.1 se visualiza el flujo desde la generación de los residuos plásticos hasta su tránsito al sector del reciclado [32].



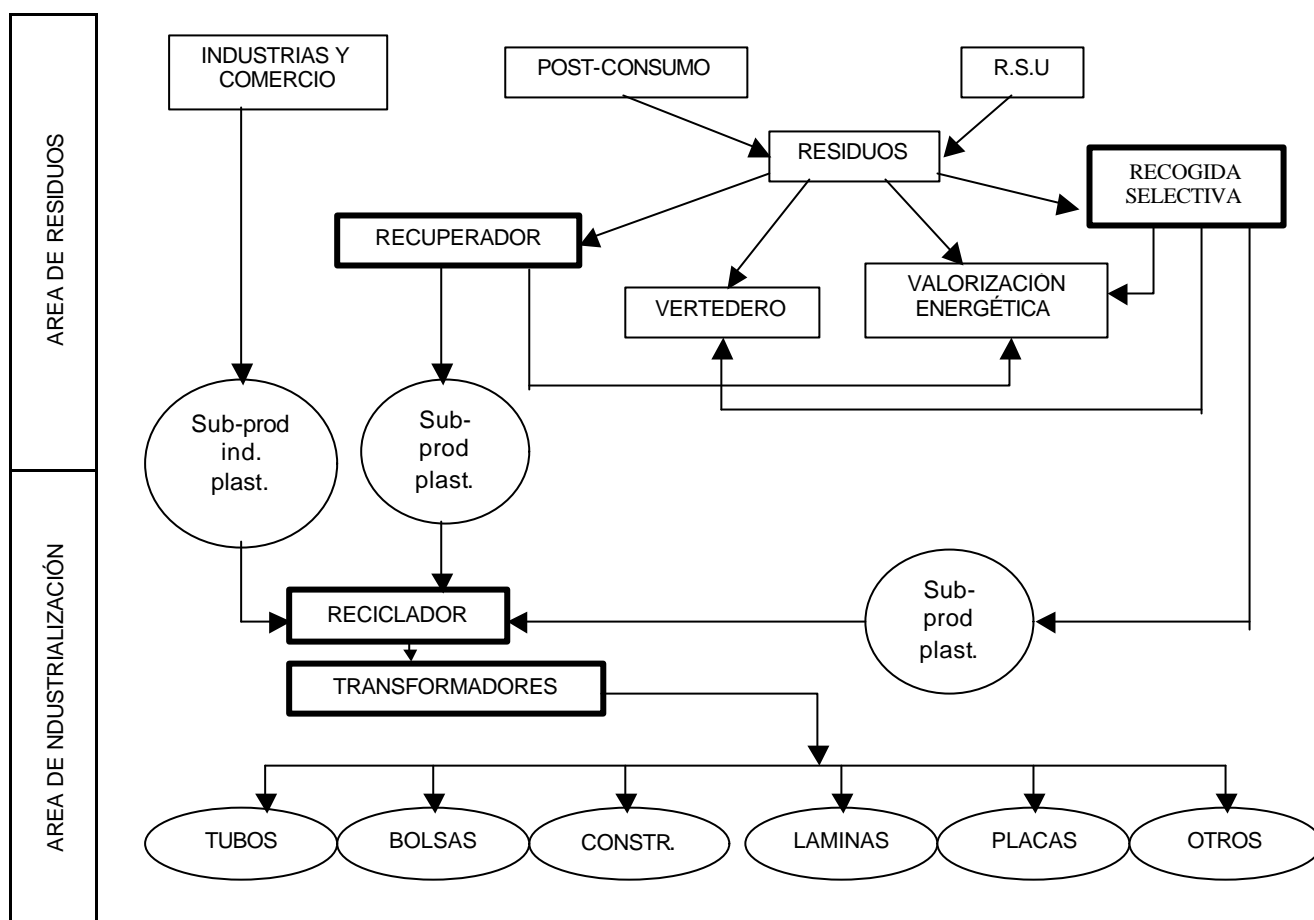


Figura 9.6.1

Flujo de los residuos plásticos

9.6.1. Reciclado mecánico

El reciclado mecánico de los plásticos es la opción más importante y consiste en separar, limpiar y triturar los objetos plásticos desechados para elaborar granza que servirá para fabricar nuevos objetos. Sin embargo, el reciclado de plásticos resulta difícil por las siguientes razones: falta de homogeneidad dentro del mismo tipo de polímero, presencia de aditivos para ignifugación quizás superados o en vías de sustitución y el valor del plástico recuperado es bajo comparado con otros materiales como metales preciosos, vidrio, etc.

Las operaciones básicas en el proceso de reciclado mecánico son las siguientes:

- Almacenamiento y clasificación
- Identificación



- Triturado o molienda
- Lavado
- Homogeneización
- Extrusión granceada
- Homogeneización final y control de calidad
- Expedición y distribución

A continuación se ilustra en la Figura 9.6.1.1 el esquema del proceso de reciclado mecánico de los plásticos [32]:

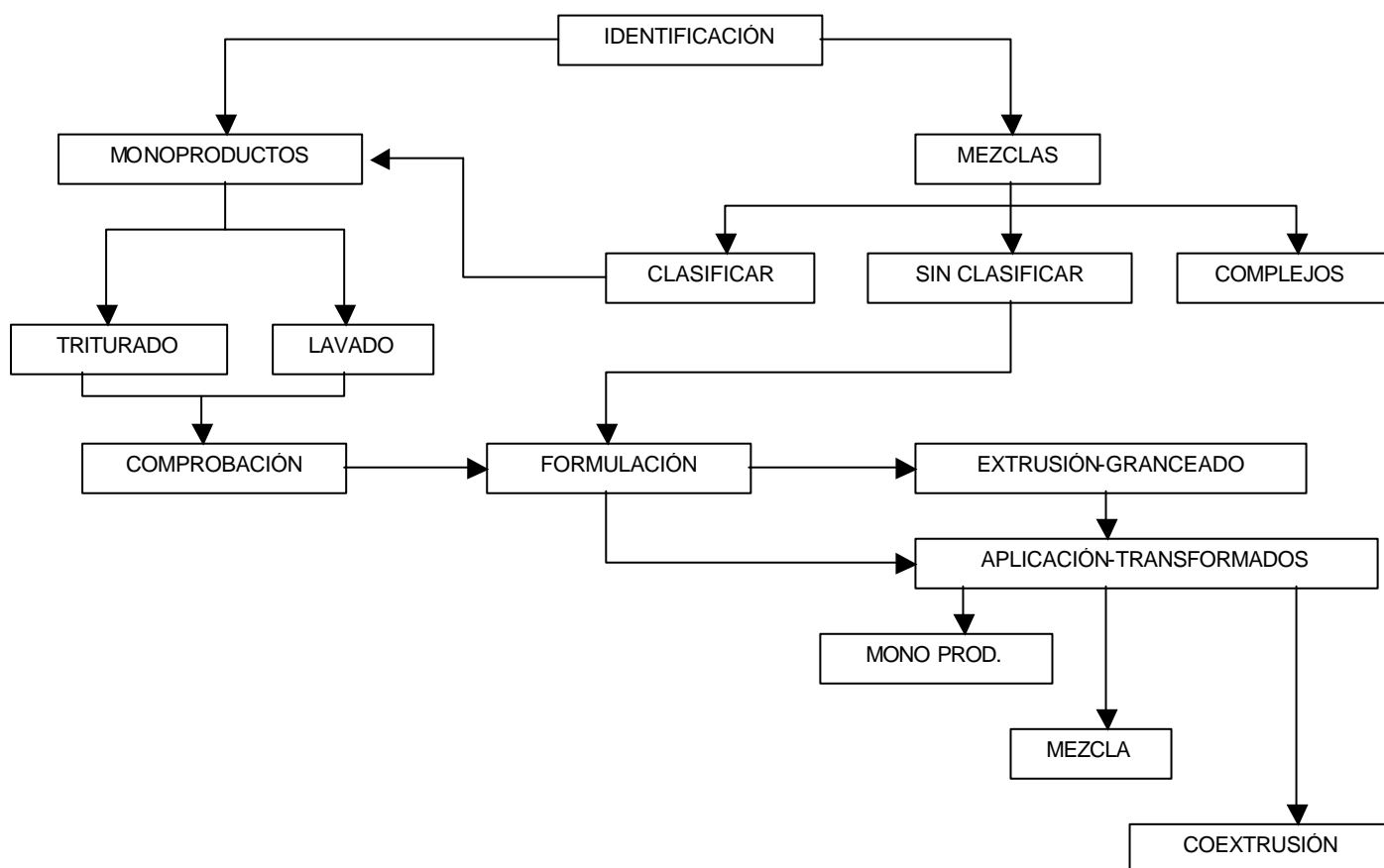


Figura 9.6.1.1

Diagrama de los procedimientos del reciclado mecánico



Según el tipo de plástico disponible, el proceso de reciclado será distinto. A continuación se detallan estos procesos para los plásticos más significativos en los RAEE [32]:

- Polietileno de baja densidad (PEBD): se encuentra en residuos domésticos: bolsa, botellas, menaje y juguetes; en residuos industriales: sacos, bolsas, filmes, tubos y recubrimientos de cable y en agricultura. Si no está mojado, se recicla por proceso de **triturado-densificado** y **extrusión-granceado**.

El PE procedente de post-consumo doméstico no es apreciado. Puede mejorar su calidad con la implantación de los sistemas de recogida selectiva.

Los cables revestidos y aislados con PEBD se tratan a veces químicamente o con radiaciones para enlazar las moléculas del polímero y aumentar su resistencia a la abrasión. En ese caso, el material se llama polietileno entrecruzado (PE-X) y no se puede reciclar mecánicamente, aunque sí puede utilizarse para la generación de energía en incineradores autorizados o reciclarse como materia prima.

- Polipropileno (PP): las piezas de este material se recuperan sometiéndolas a **triturado** y no siempre se **grancean**.
- Policloruro de vinilo (PVC): el polímero (resina) virgen se formula con estabilizantes y plastificantes según la aplicación a que se destine. Así, un PVC rígido para una botella de agua mineral contiene estabilizantes de calidad alimentaria, un PVC para perfilería de persianas o tuberías contiene familias distintas de estabilizantes además de cargas.

Un PVC plastificado para carpetas de papelería o recubrimiento de un cable eléctrico contiene sendos plastificantes. De aquí que, para la recuperación y su posterior reciclado, sea muy importante conocer la aplicación de origen.

Las técnicas de reciclado son distintas: con el PVC rígido se recurre a la **molienda** con distintas técnicas, mientras que con el PVC plastificado se **grancea**.

El PVC procedente de armarios de ordenadores y teclados puede utilizarse en segundas aplicaciones idénticas, siempre que el PVC se separe por completo del resto de los materiales de los ordenadores y vuelva a ajustarse el color.

La presencia de pequeñas cantidades de poliolefinas, como el PE y PP, no influye demasiado en la calidad de los productos reciclados. Sin embargo, la presencia de PET o goma en los plásticos ricos en PVC puede bajar la calidad del PVC reciclado.



- *Poliestireno (PS)*: existen dos variedades: el PS rígido, sólido o modificado (SB) y el PS expandido (EPS). En forma sólida, el PS se utiliza en embalajes, tazas y platos y en aparatos eléctricos y electrónicos. Los PS se recuperan y se reciclan, con técnicas de **triturado** y de **granceado**, desde residuos de post-consumo industrial.
- *Fluoropolímeros (PTFE)*: el PTFE y sus copolímeros suelen utilizarse en pequeños componentes en aplicaciones complejas concretas, como equipos eléctricos y electrónicos, transporte, etc. Cuando pueden recuperarse cantidades suficientes de PTFE idóneo que hagan posible su reciclado, deben enviarse a empresas especializadas, pero como sucede con la mayoría de los polímeros, pueden reprocesarse por métodos normales de **extrusión** en empresas de moldeado con poca tecnología adicional a la que se necesita en el caso de los plásticos vírgenes.
- *Plásticos que contienen éteres de difenilo polibromado (PBDE)*: los desechos plásticos que contienen PBDE deben eliminarse de los procesos de reciclado de materiales debido a la posibilidad de que liberen dioxinas y furanos. Es más aconsejable tratar estos residuos en instalaciones de reciclado como materia prima o en incineradores autorizados en condiciones controladas y con recuperación de energía.
- *Otros materiales*: el resto de materiales que se recuperan son básicamente ABS y poliamida. Se utilizan técnicas de **molturación** y **extrusión-granceado** de diseño particularizado dadas las distintas propiedades térmicas. Se aplican en piezas industriales.

El reciclaje mecánico tradicional de los plásticos está considerado todavía como la mejor opción por parte de un gran número de actores. Sin embargo, solamente es aplicable a una fracción de los residuos de plástico que aparecen relativamente limpios y fáciles de separar en monofracciones. Con todo, el mayor problema del reciclaje mecánico de plásticos tiene que ver con la capacidad de absorción del mercado, entre otras cosas porque se presentan en fuerte competencia con los plásticos vírgenes. En este contexto se necesita encontrar alternativas de reciclaje para los residuos de plástico mezclados cuya separación en monofracciones resulta muy costosa, consume energía y no es necesariamente ventajosa desde el punto de vista medioambiental.

El reciclado aumentaría si se avanzase en las tecnologías de identificación y separación así como en incremento de la recogida selectiva de equipos eléctricos o electrónicos que han llegado a su fin de vida. En un futuro el reciclado mecánico de estos equipos será



más fácil, ya que actualmente los nuevos EEE están mejor diseñados para su posterior reciclado.

9.6.2. Reciclado químico

Mientras que en el reciclado mecánico se utiliza el polímero como tal para producir nuevos productos de polímero, también es posible introducir los plásticos en una gama de procesos que utilizan la química esencial de la mezcla de desechos plásticos para recuperar valor. Generalmente a esos procesos se les denomina reciclado como materia prima (proceso en el que se rompen las cadenas de polímero en sus componentes básicos) y reciclado químico. Este reciclado químico es una opción para aquellos plásticos que no se puedan reciclar mecánicamente, como plásticos mezclados provenientes de EEE, el cual está ganando terreno día a día.

Entre las tecnologías utilizadas están la extrusión degradativa, la pirolisis, la hidrogenación, la gasificación, la incineración con recuperación de HCL, el insumo en calidad de agente reductor en hornos siderúrgicos, la glicolisis, la hidrolisis y la metanolisis. Actualmente se han desarrollado unas 70 iniciativas de ese tipo. Estos tratamientos conducen a productos tales como monómeros de partida, gas de síntesis y corrientes hidrocarbonadas [33]. Algunos estudios han probado que el reciclado químico es medioambientalmente favorable pero económicamente dudoso. A continuación se detallan las prácticas más generalizadas de este tipo de reciclaje:

- **Glicólisis:** este proceso rompe las piezas de plástico en sus bloques químicos constituyentes básicos, para ser después reutilizados en la producción de nuevas piezas. En el caso ideal, el proceso devuelve el glicolizado (mezclas de los bloques constituyentes originales y químicamente modificados) al sistema original en un ciclo cerrado.
- **Hidrolisis:** el proceso de hidrolisis descompone los residuos plásticos en una serie de reacciones químicas.
- **Pirolisis:** la pirolisis consiste en un proceso de descomposición térmica de las sustancias químicas en ausencia de oxígeno en una cámara cerrada. Los productos de la pirolisis se pueden utilizar como producto químico o fuel.
- **Hidrogenación:** la hidrogenación es un tratamiento con hidrógeno a altas temperaturas y con presión, el cual produce gases y aceites que son más puros que los procedentes de la pirolisis.



La pureza de los gases y el aceite derivados de la pirolisis y la hidrogenación, y el coste asociado para producir productos acabados son factores importantes que aún deben de ser resueltos.

- **Depolimerización:** la reconversión directa a los monómeros de partida de un polímero, que pueden así ser de nuevo polimerizados regenerando el polímero virgen es aplicable a macromoléculas de policondensación, con el polietilentereftalato (PET) y poliamidas (nylons) y a algunos polímeros de adición como es el caso de los poliuretanos. El éxito de este tipo de tratamientos depende, en gran manera de la disponibilidad de una materia prima bien definida a través de un buen sistema de recogida y limpieza y de los costes de reprocesado del polímero. La depolimerización química se efectúa, fundamentalmente, a través de reacciones de hidrólisis, alcoholisis o glicolisis.
- **Gasificación:** en la gasificación tiene lugar la oxidación parcial de los hidrocarburos que produce gas de síntesis (mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno) que puede utilizarse como combustible para la generación de electricidad, materia prima para la fabricación de metano, amoníaco de alcoholes OXO o, incluso, como agente reductor para la producción de acero en altos hornos. En el proceso los residuos, previamente compactados y desgasificados, se pirolizan a 600 °C y alimentan al gasificador a 2.000 °C. El gas de síntesis obtenido, una vez limpio se quema en una turbina de gas para producir electricidad.
- **Reciclado con generación de fracciones hidrocarbonadas:** las tecnologías empleadas en la industria del refino para transformar fracciones petrolíferas de alto peso molecular en otras más ligeras son una alternativa válida para el reciclado de los materiales plásticos, sobre todo si éstos coalimentan a las unidades de refinería junto con sus cargas tradicionales.

Una de las posibles clasificaciones de la gran variedad de procesos utilizables atiende al uso, o no, de agentes catalíticos. Los procesos meramente térmicos, que no emplean catalizador, tales como el cracking térmico, la pirolisis y la termólisis, se llevan a cabo, con o sin adición de oxígeno, a temperaturas de operación entre 400-800 °C bajo presión reducida o en atmósfera inerte generalmente en un lecho fluidizado de arena. Los hidrocarburos producidos pueden ser tratados en refinería o utilizados como combustibles.

Para el aprovechamiento de los residuos plásticos también se pueden utilizar procesos catalíticos de refino tales como el cracking, hidrocracking o la hidrogenación. Los tratamientos en presencia de hidrógeno son, por el momento,



los que parecen más desarrollados. En los procesos de cracking o hidrocracking catalítico, la transformación de los residuos tiene lugar en presencia de zeolitas, aluminosilicatos o catalizadores superácidos, originando como productos fracciones de hidrocarburos de diferente composición y uso.

La mayoría de esas tecnologías se están desarrollando para manipular una amplia gama de plásticos en un proceso único que redunde en productos de la misma calidad que las materias primas vírgenes y se centra normalmente en la recuperación de los compuestos orgánicos presentes en el plástico. Algunas de las tecnologías están específicamente diseñadas para tratar los desechos de PVC y se centran principalmente en la recuperación del cloro de una forma útil; algunos de esos procesos permiten la separación de metales pesados. Esos procesos apenas se encuentran en las primeras etapas de desarrollo y comercialización.

El reciclado o la recuperación del plástico se puede llevar a cabo mediante dos tipos de procesos diferentes:

- Primeramente, el **reciclado químico** cuyo objetivo es reprocesar los componentes químicos básicos de los materiales plásticos para su reutilización en la industria química. Los desechos plásticos se despolimerizan en monómeros que pueden utilizarse de nuevo directamente para la polimerización (quimiólisis) o en materias primas químicas de peso molecular más bajo (termólisis o craqueo) que pueden utilizarse, como el aceite natural, en reacciones químicas entre las que figura la producción de polímeros.
- El segundo es en la **producción de hierro**, donde las propiedades químicas reductoras de los desechos plásticos se utilizan como complemento del coque en hornos siderúrgicos. Las posibilidades de utilización de desechos plásticos en hornos siderúrgicos quedan demostradas en las 100.000 toneladas que se utilizaron en esos procesos en Alemania en 1996. Un proceso más avanzado, con una capacidad de 5.000 a 8.000 toneladas anuales, ha pasado la prueba en el Japón [34]. En ese proceso, la mezcla de plásticos ricos en PVC se somete a pirolisis en un horno lleno de nitrógeno. Los productos para el horno siderúrgico son ácido clorhídrico y hulla residual. Un proceso pirolítico similar puede aplicarse en la producción de cemento. Se ha ensayado y está en funcionamiento una planta experimental para cargar ácido clorhídrico en un proceso de producción de oxígeno y cloruro de hidrógeno (oxicloración) a partir del monómero del cloruro de vinilo (VCM).

Las tecnologías de reciclado químico suelen generar cantidades relativamente pequeñas de residuos. La producción de material para los procesos de producción química



habitualmente genera algunas escorias de los materiales inertes presentes en los desechos plásticos y en las costras de lodo remanentes del tratamiento de las aguas residuales. Para algunos procesos existen criterios de aceptación concretos en relación con el contenido en cenizas del desecho con miras a reducir la generación de escorias.

Los metales pesados presentes en los desechos plásticos, como los que se utilizan en los estabilizantes del PVC, terminan en la corriente de desechos o, en el caso de la producción de acero, se incorporan a éste. En la producción de acero, los metales pesados procedentes de los desechos plásticos no suelen ser la fuente principal de metales pesados en esos residuos, debido al porcentaje relativamente bajo de plásticos que se utiliza en el proceso.

9.6.3. Recuperación energética

Los plásticos que no se pueden reciclar mecánicamente o químicamente todavía tienen un valor calorífico y se ha demostrado que se puede utilizar como combustible alternativo en procesos industriales y, finalmente como combustible en plantas térmicas con recuperación de energía, debidamente equipadas y mantenidas. De esta manera se reduce el volumen de residuos sólidos y se realiza una valorización energética. Los plásticos en general no son válidos para permanecer en vertederos porque contienen una gran cantidad de energía potencial.

Una combustión a alta temperatura constante recuperará el máximo de energía del combustible y garantizará el fraccionamiento total de los compuestos orgánicos tóxicos. El método más eficaz de recuperación de energía (hasta el 85%) es la incineración de los desechos hasta producir vapor a alta presión para la generación de electricidad, vapor a baja presión para uso industrial y agua caliente para la calefacción de los hogares.

Se está ensayando el uso de residuos plásticos mezclados en tanto como hidrocarburos, aprovechando su poder reductor debido al contenido de hidrógeno, en plantas existentes dentro del sector del hierro y del acero. Su consecución ha requerido el desarrollo de sistemas de acondicionamiento, tratamiento y texturización de los residuos, la determinación del comportamiento de los mismos en el horno y de la calidad de los productos resultantes y el análisis de ciclo de vida. Los resultados de los ensayos han demostrado que esta opción es técnica y medioambientalmente favorable [35].

El papel que desempeñan los polímeros clorados en la formación de dioxinas en los incineradores de desechos ha sido tema de controversias. Se ha demostrado que la extracción de polímeros clorados de una mezcla de desechos no reduce proporcionalmente la formación de dioxina y que, incluso si se extrajera todo el PVC de la



mezcla de desechos, el cloro remanente bastaría para formar dioxinas a niveles que hacen necesario el tratamiento de los gases de la combustión [36].

La incineración de desechos plásticos que contienen BFR (pirorretardantes bromados) es motivo de especial preocupación. Una de las principales razones de la controversia que actualmente rodea a los BFR, en particular a los PBB y los PBDO, es la posible formación de dioxinas y furanos durante la combustión tanto de los propios BFR como de los materiales que los contienen.

Dadas las limitaciones con las que se encuentra el reciclaje de plástico en general, se postula que la recuperación energética debe ser considerada como una opción complementaria. El uso de incineraciones cuidadosamente controladas para convertir los desechos post-consumo en energía aprovechable se practica en diversos países europeos como Alemania, Suecia, Suiza y Dinamarca donde estas técnicas son practicadas para suministrar a las comunidades locales electricidad y calefacción. Hasta un 10% de los requisitos de electricidad doméstica pueden ser generados por estas unidades y cada vez está siendo más considerada como una opción de recuperación aceptable. La Asociación Europea de Fabricantes de Plásticos (APME) estima que la situación óptima desde el punto de vista ambiental y económico se sitúa en un reciclaje del 15% y una valorización energética del 85% [37].

9.6.4. Técnicas de separación e identificación de plásticos

Las tecnologías tradicionales para la separación y clasificación de plásticos se basan principalmente en la diferencia de densidades. Algunas de estas técnicas son las mencionadas a continuación:

- Clasificación manual.
- Separación por corrientes de Foucault (recuperación de metales no férreos).
- Separación magnética (recuperación de metales férreos).
- Separación mediante cribas.
- Separación neumática.
- Flotación.
- Hidrociclones.
- Robots y manipuladores.



- Separación por densidades.
- Separación electrostática.
- Disolución selectiva.
- Separación por superficies inclinadas.
- Separación por impacto.
- Separación por fuerzas centrífugas.
- Separación por diferencias en los puntos de fusión mediante pegado a una superficie.

Estas tecnologías encuentran dificultades al tratar de separar plásticos con densidades similares, como los pares PP/PE o PVC/PET, al clasificar por colores plásticos que tienen la misma composición, o también, cuando los aditivos, refuerzos o cargas, que algunos polímeros pueden contener, modifican sus características físicas.

Las técnicas de identificación de plásticos se basan en las diferencias existentes en sus características físicas o químicas, así por ejemplo la densidad o el espectro de infrarrojo.

Los métodos tradicionales de identificación de plásticos más utilizados son los métodos basados en la densidad, punto de fusión, solubilidad, calor específico, conductividad, propiedades electrostáticas, humectación y propiedades superficiales. Muchos plásticos presentan propiedades físicas demasiado similares para poder realizar la identificación basándose en una sola técnica, por lo que requieren combinar varias, como las especificadas a continuación:

- Basados en propiedades eléctricas.
- Identificación de diferentes colores.
- Espectroscopia de infrarrojo: cercano (NIR), medio (MIR) y Raman.
- Respuesta a impulso térmico (TIR).
- Espectroscopia de emisión en plasma inducido por láser (LIPS).
- Espectroscopia de fluorescencia de rayos – X.
- Espectroscopia de masas (MS).



- Espectroscopia ultravioleta (UV).

Para que un sistema de identificación automática de plásticos sea aplicable industrialmente, es deseable que reúna características como robustez y fiabilidad, y tener un alto índice de aciertos en la identificación con una rapidez adecuada, sería deseable inferior a 0,1 segundos. Por otro lado, es un factor importante la capacidad de integración del sistema de identificación a instalaciones automáticas de separación para incrementar rendimientos.

La siguiente Tabla 9.6.4.1 resume las técnicas de separación e identificación disponibles de los plásticos y especifica algunas de sus características [38].

Procedimiento	Principio	Evaluación de la eficacia
Separación por flotación - hundimiento	Separación por gravedad específica	Sólo es eficaz la separación de dos o tres plásticos; bajo efecto de separación; los rellenos perturban el proceso
Separación por centrifugación	Separación por gravedad específica	Pureza entre 95 y 99,9%
Flotación	Adición selectiva de burbujas de aire en un medio acuoso	Es necesaria la adición de reactivos, baja eficiencia, los aditivos y rellenos perturban el proceso
Separación por flotación mediante reactivos selectivos	Cuatro plásticos: PVC, PC, POM y PPE, pueden separarse de sus mezclas sintéticas por medio de agentes humectantes comunes, como el sulfonato sódico de lignina, el ácido tánico, el aerosol OT y la saponina	Pureza entre 87 y 90%
Electroseparación	Uso de carga electrostática en campos eléctricos para separar el PVC y el PE de cables y alambres	Pureza superior al 90%, los contaminantes perturban el proceso, revestimiento de la superficie
Espectroscopia del infrarrojo medio (MIR)	Pueden distinguirse once clases de plásticos: PE, PP, PVC, ABS, PC, PA, PBT, PPE, y EPDM. Espectroscopia de reflexión de 2,5 a 50 μm , estimulación de oscilaciones de grupo	Buena identificación de plásticos técnicos, amplia preparación de la muestra, no puede automatizarse y es muy lento (= 20s/análisis)
Espectroscopia del infrarrojo cercano (NIR)	Separación de PET, PVC, PP, PE, y PS (espectroscopia de reflexión de 800 a 2500 nm, estimulación de oscilaciones armónicas y oscilaciones combinadas)	Buena identificación de envases plásticos, los rellenos (hollín) perturban el proceso, revestimientos de superficies, geometría de las muestras. Imposible identificar polímeros de color negro y aditivos



Espectroscopia de plasma inducido por láser complementada con espectroscopia NIR	Se dirige un haz láser pulsatorio hacia el plásticos para producir un fogonazo debido a una densidad de potencia elevada. El fogonazo genera un plasma hiperdenso que excita todos los elementos atómicos en el volumen enfocado	
Espectroscopia por rayos infrarrojos basada en la transformada de Fourier (FT-IR)		Funciona para todos los plásticos, pero se necesitan largos períodos de medición para los plásticos de color negro debido a la preparación y medición de las muestras
Espectroscopia por rayos UV del espectro visible infrarrojo (UUVIS)	Espectroscopia de reflexión de 200 a 400nm, estimulación de vibraciones y electrones	Identificación mínima de los polímeros, gran influencia de los aditivos (tintes), difícil de automatizar
Espectroscopia fotoelectrónica láser (PES)	Separación de PET, PVC, PP, PE, y PS. Espectroscopia de emisión láser-plasma-átomo/respuesta de impulso térmico/termografía por rayos infrarrojos	Identificación mínima de polímeros, identificación de ingredientes heteroatómicas; en principio automatizable
Fluorescencia de rayos X	Los espectros lineales de rayos X utilizados como método de detección muestras la presencia de elementos	Identificación mínima de polímeros, identificación de elementos, difícil de automatizar. Eficaz sólo para separar PVC de los plásticos PETE
Discriminación óptica	Utilizado como método de detección. Inspección óptica mediante fotodiodos o visión mecánica con dispositivos de acoplamiento de carga (CDD)	Util para clasificar plásticos según la transparencia y el color, pero no puede identificar químicamente a los polímeros
Espectroscopia de masas	Detección de productos pirolíticos mediante espectroscopia de masas	Demasiado tiempo (1min.), poco efecto de separación, difícil de automatizar
Separación electrostática	- Separación de lanilla de PVC reticulada con PE de cables - Separación de copos mezclados de PVC y PET en botellas desechadas	

Tabla 9.6.4.1

Técnicas de separación e identificación de los plásticos

9.6.5. Nueva tecnología para reciclar plásticos

En la actualidad el Centro Tecnológico GAIKER está llevando a cabo diversos proyectos relacionados con el desarrollo de una tecnología que permita una rápida identificación y separación automática de residuos plásticos para su posterior reciclado. Entre estos proyectos, está el liderado por un consorcio europeo mixto de empresas y centros de investigación en el cual se propone el desarrollo de un sensor híbrido que combine varias tecnologías complementarias de identificación, y que por lo tanto sea capaz de operar con diferentes residuos permitiendo obtener fracciones de gran calidad. Entre otros de los participantes de este proyecto europeo, destacan las empresas SONY International, Philips Competence Centre Plastics, Indumetal Recycling S.A. y centros de investigación como son Fraunhofer ICL o Laser Zentrum Hannover [39].



Este sistema será capaz de manipular, dosificar y separar de forma automática las partes plásticas procedentes de equipos eléctricos y electrónicos al final de su vida útil. Además también deberá identificar los plásticos, no sólo en función del tipo de polímero, sino también en función de aditivos, tales como compuestos halogenados o metales pesados.

Las técnicas de identificación empleadas en el sensor son una combinación de espectroscopia de infrarrojo (MIR, NIR), termografía de pulso (TIR) que permiten una rápida identificación de los polímeros tanto oscuros y coloreados como naturales, y espectroscopia de láser (LIBS, LIPS) para la identificación de aditivos tales como metales pesados o halógenos.

Se desarrollará una base de datos y algoritmos para la identificación de los polímeros, cargas y aditivos más comunes en el sector eléctrico y electrónico. El sistema tendrá la capacidad de autoaprendizaje y estará abierto para incluir nuevos plásticos y aditivos. Con estos nuevos desarrollos se podrá alcanzar en el sistema de identificación una capacidad de tratamiento entre 500 y 1000 kg/h, en su primer prototipo.

9.7. Substitución de sustancias peligrosas

La Directiva 2002/95/CE, como se ha comentado ya en el apartado 5, establece que a partir del 1 de Julio de 2006 los nuevos AEE que se pongan en el mercado no contengan plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente, polibromobifenilos (PBB) o polibromodifeniléteres (PBDE).

La industria encuentra problemas en la substitución del plomo en las soldaduras debido a factores como la mayor temperatura de fusión del material alternativo (aleaciones de estaño) que obligaría a adaptar el resto de los materiales para que puedan soportar esas temperaturas. Los adhesivos conductivos fallan en cuanto a la capacidad de producción a gran escala y pueden tener un impacto sobre el reciclaje.

El mayor problema que presentan los retardantes de llama es el del riesgo de generación de dioxinas en los procesos de reciclaje por parte de algunos de ellos. Tal es el caso de los polibromodifeniléteres (PBDE). La industria europea de retardantes de llama está siendo muy activa en la investigación de métodos como la pirolisis que permitan reciclar EEE usados de manera segura para el medio ambiente.

9.8. Necesidades en Investigación y Desarrollo

El informe de la IPTS [40], teniendo en cuenta que la mayoría de los conceptos relacionados con el reciclaje de los EEE se encuentran en estados de inmadurez,



recomienda promover actividades de I+D (Investigación y Desarrollo) en las siguientes fases:

- Ecodiseño de nuevos productos (diseño para el medio ambiente o diseño para el reciclaje).
- Tecnología de desmontaje y diseño para el desmontaje.
- Substitución de la soldadura de plomo.
- Diseño y operación piloto de esquemas de RAEE a gran escala.
- Análisis de impacto ambiental de los esquemas de gestión de los RAEE.
- Modelos de análisis de ciclo de vida para productos electrónicos, módulos y componentes.
- Caracterización de materiales, separación e impacto ambiental de los mismos.
- Tecnología de la información y de la comunicación para el intercambio de la información sobre los productos.
- Modelos económicos y financieros.
- Aspectos relativos al empleo y a la economía.



10. Propuesta de una ruta alternativa para la gestión integral de los RAEE

En este último apartado se pretende proponer un sistema global alternativo para llevar a cabo la gestión de los residuos eléctricos y electrónicos. La propuesta está basada en el análisis establecido en los apartados anteriores de las distintas alternativas existentes sobre el reciclado de los RAEE. Por supuesto, esta no es la única opción existente, simplemente pretende ser una orientación de las posibles vías alternativas a seguir.

La Directiva europea 2002/96/CE permite que los fabricantes decidan si optan por un sistema colectivo o por uno individual con respecto a los futuros residuos y atribuye una responsabilidad financiera colectiva por los residuos históricos a los fabricantes. Para que la responsabilidad ampliada del fabricante tenga un efecto directo en el diseño de los productos, se aconseja que los fabricantes se responsabilicen de manera individual de los productos de su propia marca. De este modo, toda mejora en el diseño tendrá una repercusión directa en los costes que los fabricantes tendrán que asumir para el posible tratamiento de los productos al final de su vida útil.

Por el contrario, la responsabilidad financiera colectiva sólo tendrá un efecto indirecto en el diseño ya que los esfuerzos de una empresa concreta por lograr un diseño mejor, que resultaría en un ahorro de los costes, se diluirían y perderían en el sistema colectivo. Las mejoras, con un sistema colectivo, sólo podrán lograrse a través de las fuerzas del mercado cuando los dos sistemas compitan entre ellos y sólo en una fase muy posterior.

El sistema de gestión propuesto se divide en dos partes, la primera es la recogida de los residuos y la segunda es el tratamiento de los mismos.

Sistema de recogida: se establecerán puntos de recogida a lo largo del territorio para que se almacenen los RAEE procedentes de hogares particulares. El transporte de los RAEE depositados en los puntos de recogida y en industrias, comercios e instituciones hacia el centro de procesado correrá por cuenta de los productores. Los fabricantes sólo serán responsables de sus propios residuos, por lo que se hace necesario examinar los costes del centro de procesado y separarlos según el fabricante. Ello puede hacerse sirviéndose de una empresa de reciclado reconocida o registrada, capaz de leer los códigos de barras de los artículos al clasificarlos, y que facture mensualmente al fabricante según el origen del producto indicado por el código de barras.



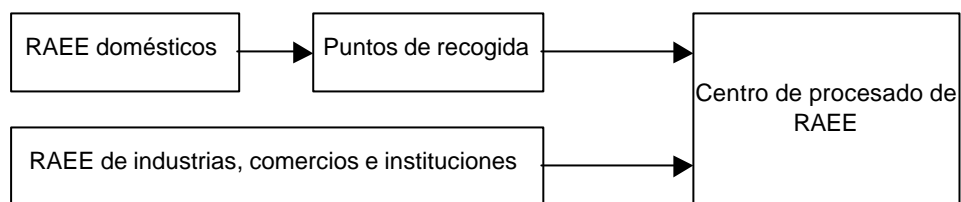


Figura 10.1 Sistema de recogida de los RAEE

Sistema de tratamiento y reciclado de RAEE: se dará prioridad a la reutilización de los RAEE o alguno de sus componentes, reparándolos si fuera necesario. En este proceso, como mínimo se retirarán todos los fluidos y componentes señalados en el Anexo II de la Directiva europea 2002/96/CE, es decir: condensadores con PCB, componentes con Hg, pilas y acumuladores, tarjetas de circuitos impresos, cartuchos de tóner, plásticos con BFR, residuos de amianto, TRCs, CFCs, entre otros (ver Anexo II de la Directiva 2002/96/CE adjunta en el Anexo B.2).

A continuación, en la Figura 10.2, se esquematiza el proceso de tratamiento y reciclado de RAEE:



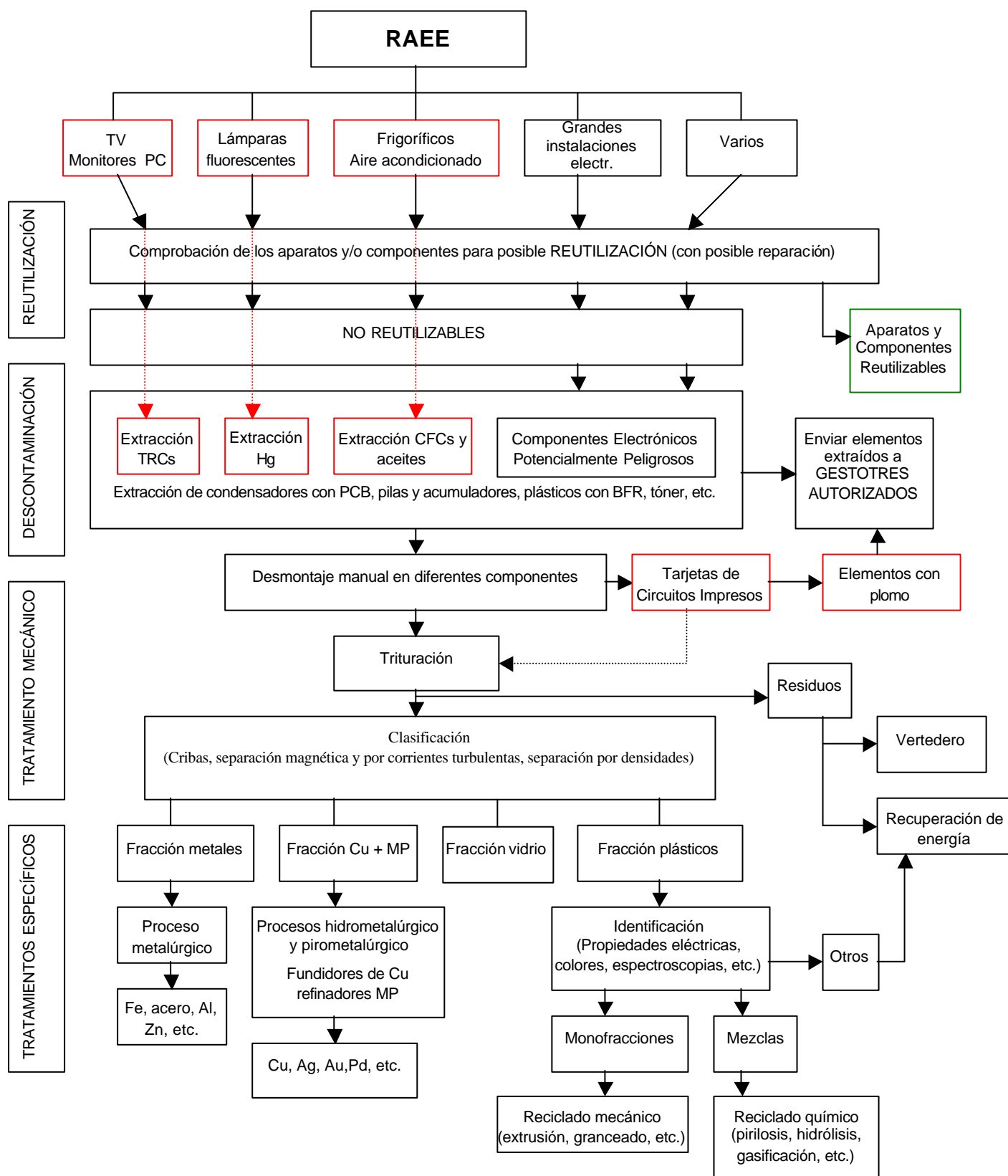


Figura 10.2

Sistema de tratamiento y reciclado de los RAEE



Conclusiones

Teniendo en cuenta que hoy en día prácticamente el 90 % de los RAEE se depositan en vertederos, se incineran o bien se recuperan sin ningún tipo de pretratamiento, se considera como una necesidad la promoción de prácticas de reciclado de estos residuos. Ello evitaría el desperdicio innecesario de gran parte de sus componentes, los cuales todavía poseen un valor, bien para ser reutilizados, recuperados o bien para ser reciclados, y además se evitarían también las emisiones incontroladas de sustancias peligrosas al medio ambiente.

A raíz de esta preocupación, se han desarrollado dos Directivas europeas que responsabilizan directamente a los productores en la tarea de organizar los sistemas de tratamiento de los RAEE y restringen el uso de ciertas sustancias peligrosas, determinando para ello unas fechas límite de cumplimiento obligado. La aparición de este tipo de legislación implica que todo el sector industrial se mentalice y preocupe, forzosamente, en establecer unas reglas de juego y de crear una red organizada para llevar a cabo la gestión de los RAEE. Además las empresas productoras deberán diseñar sus productos respetando el medio ambiente, pensando ya, no sólo en la fase de producción, sino también en la fase de rechazo y reciclado (ecodiseño).

A lo largo de los últimos años se han desarrollado en Europa diversas experiencias piloto, analizando diversos tipos de recogida y de tratamiento de los RAEE. Se han probado diferentes modalidades, por ello se deberían establecer comunicaciones e intercambios de información entre los distintos países y empresas que han desarrollado estas experiencias, con el fin compartir impresiones y de optimizar los procesos.

El primer paso en la gestión de los RAEE es el diseñar un óptimo sistema de recogida de los residuos. En este paso resulta crucial la figura del usuario, por ello es necesario crear campañas de concienciación e información, que inciten a los ciudadanos a la participación activa en este tipo de iniciativas. El éxito de esta fase radica en educar correctamente a los consumidores, no solamente en el hecho de retirar los residuos de la manera adecuada, sino también, educarlos en la conveniencia de utilizar los equipos con las prestaciones adecuadas a sus necesidades y de tener presente las posibilidades de reparación y reutilización de los mismos.

Un procedimiento lógico en el tratamiento de los RAEE, esquematizado en el apartado 10, es, primeramente, clasificar los residuos en distintos grupos y comprobar si alguno de estos equipos o bien alguno de sus componentes se pueden reutilizar. Posteriormente, para los aparatos o componentes que no sean reutilizables, se procede a su descontaminación, donde se separan los componentes potencialmente peligrosos para



enviarlos a los gestores autorizados para su tratamiento específico. Una vez descontaminados, los equipos se tratan mecánicamente, donde se separan y se concentran los distintos materiales que los forman, para que con posterioridad se les aplique el tratamiento específico que necesiten. Las distintas fracciones obtenidas suelen ser metales (preciosos o no), vidrio y plásticos.

En cuanto a la rentabilidad económica de estos procesos, hay que destacar que antiguamente los AEE disponían de mayor cantidad de metales preciosos y no tantas mezclas de materiales tan difíciles de recuperar o de reciclar. El simple hecho de recuperar los metales preciosos y otros metales ya les suponía a las empresas que trataban y reciclaban los residuos unos beneficios, que permitían afrontar favorablemente los gastos de desmontaje y tratamiento, además de unos ingresos.

Sin embargo, actualmente el consumo de metales preciosos ha disminuido considerablemente y se han añadido otros materiales, como es el caso de los plásticos, que cada vez son más utilizados. Debido a este motivo, se han encarecido los distintos tipos de valorización y reciclaje de los RAEE y para poder obtener los mismos beneficios las empresas han tenido que desarrollar otros tipos de procesos (combinación de procesos mecánicos y químicos). Además la fase de recogida selectiva de los residuos también comporta una suma considerable de costos a tener en cuenta. Por tanto, la colaboración entre naciones y empresas del sector puede resultar de ayuda, ya que se podrá generar una situación de desarrollo de la gestión de los RAEE y por consiguiente, una mejora económica en el proceso. Aunque no hay que olvidar que el mayor beneficio procedente de esta gestión es el respeto al medio ambiente y la colaboración eficaz con un desarrollo sostenible.



Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] AEA Technology (1997). *Recovery of WEEE: Economic and Environmental Impacts*. Final report.
- [2] NORDIC COUNCIL OF MINISTERS (1995). *Environmental Consequences of Incineration and Landfilling of Waste from Electrical and Electronic Equipment*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers.
- [3] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2000). *Plan Nacional de Residuos Urbanos (2000-2006)*. p. 6-7. [<http://www.fundacionentorno.org/pdf/fondo/pnrmma.pdf>, consulta el 24 de junio de 2003].
- [4] BAN (Basel Action Network) (2003). *Electronics Recyclers Pledge of True Stewardship*. [<http://www.ban.org/pledge1.html>, consulta el 23 de julio de 2003].
- [5] BAN (Basel Action Network); SVTC (Silicon Valley Toxics Coalition) (2002). *Exporting Harm: High-Tech Trashing of Asia*. [<http://www.ban.org/E-waste/technotrashfinalcomp.pdf>, consulta el 18 de septiembre de 2003].
- [6] PAPAMELETIOU, D. (2000). *Towards a European Solution for the Management of Waste from Electric and Electronic Equipment*. IPTS Publications (Institute for Prospective Technological Studies).
- [7] AMBROJO, J.C. (2002, 13 diciembre). *EEUU exporta más del 50% de su basura electrónica a países pobres de Asia*. El País, p. 35.
- [8] ROVIRA, M; DE PABLO, J. (2001). Reciclatge d'ordinadors i material electrònic. *5ª Jornada Tècnica sobre Gestió de Residus Municipals: 3 d'Abril 2001*. Barcelona: UPC [et al.], p. 101-107.
- [9] APME (Association of Plastic Manufacturers in Europe). (2001). *Plastics: a material of innovation for the electrical and electronic industry. Insight into consumption and recovery in Western Europe 2000*. Brussels: APME. p. 4.
- [10] HEDELMANLN, P; CARLSSON, P; PALM, V. (1995). Waste from electrical and electronic product. A survey of the contents of materials and hazardous substances in electric and electronic products. *Tema Nord* (Copenhagen), 1995: 554. Nordic Council of Minister.



- [11] Referencia [8].
- [12] FEEI (Austrian Electric and Electronics Industries Association) (1996). *Comparison of systems for Collection/Recycling/Disposal of end of life electrical and electronic equipment (EEE), Economic Impact*. Vienna: Institute of Industrial Research (Economy University of Vienna).
- [13] Referencia [6].
- [14] IRASARRI, L.M^a. (2002). Diseño de los equipos eléctricos y electrónicos (EEE) y su tratamiento cuando llegan a su fin de vida. En: *II Jornadas Técnicas sobre Reciclado de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Septiembre de 2002*. El Puerto de Santa María: CIT (Círculos de Investigación y Tecnología). [<http://www.uca.es/grup-invest/cit/jornadas/Jornadas2/default.html>, consulta el 24 de junio de 2003]
- [15] SCHÄFER, T. (2002). Access to secondary copper from WEEE?. En: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects. 16-20 June 2002*. Luleå (Sweden). p. 351-358.
- [16] QUEIRUGA, D.A; WALTHER, G; SPENGLER, T. (2002). Registro y tratamiento de aparatos eléctricos y electrónicos en Alemania: Situación actual y tendencias futuras. En: *II Jornadas Técnicas sobre Reciclado de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Septiembre de 2002*. El Puerto de Santa María: CIT (Círculos de Investigación y Tecnología). [<http://www.uca.es/grup-invest/cit/jornadas/Jornadas2/default.html>, consulta el 24 de junio de 2003]
- [17] Residuos de equipos eléctricos y electrónicos (2002, marzo). *Warmer Bulletin* 83/15: p. 13. [<http://www.clubresiduos.org/WB83.pdf>, consulta el 10 de junio de 2003]
- [18] GOBIERNO VASCO. Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente (2003). *Equipos electrónicos (Línea marrón)*. [http://www.euskadi.net/vima_residuos/otros_marron_c.htm, consulta el 10 de junio de 2003].
- [19] SERRAHIMA, F., VALLS, J. (2001). EL Pont de Vilomara i Rocafort: Una apuesta por la valorización de los RAEE. En: *I Jornadas Técnicas sobre Reciclado de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Septiembre de 2001*. El Puerto de Santa María: CIT (Círculos de Investigación y Tecnología). [<http://www.uca.es/grup-invest/cit/jornadas.html>, consulta el 24 de junio de 2003]
- [20] JUNTA DE ANDALUCÍA. Consejería de Medio Ambiente (2002, 21 agosto). *Medio Ambiente inicia una campaña piloto de recogida de residuos electrónicos en áreas*



metropolitanas de Andalucía. [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/prensa/ano02/agosto/nota_agosto21.html, 31 de Marzo de 2003].

[21] BRODERSEN, K. [et al.] (1992). Scrap of Electronics: Hazardous Waste or Raw Material Resource?. En: *International Conference on the Recycling of metals. 13-15 May 1992*. Düsseldorf/Neuss (Germany): ASM International (The Materials Information Society).

[22] GOLDSCHMIDT, J. (1992). Hydrometallurgical recycling of complex non-ferrous metal-bearing residues. En: *International Conference on the Recycling of metals. 13-15 May 1992*. Düsseldorf/Neuss (Germany): ASM International (The Materials Information Society).

[23] IHOBE, Sociedad pública de Gestión Ambiental. GOBIERNO VASCO (2002). Monografía sobre Aparatos Eléctricos y Electrónicos. *Plan de Gestión de Residuos Peligrosos de la Comunidad Autónoma del País Vasco 2002-2006*. [http://www.ihobe.net/publicaciones/descarga/Plan_Gestion-Anx_Electr-C.pdf, consulta el 10 de Junio de 2003]

[24] McCARTNEY, B. (1998). *Take-back of Cellular Phones*. ECTEL (European Trade Organisation for the Telecommunication and Professional Electronics Industry) Cellular Phones Take-back Working Group.

[25] La recuperación de los teléfonos móviles. (2002, julio). *Recupera*, 25: artículo 77. [<http://www.gremirecuperacio.org/revista-ficha.asp?ficha=77>, 19 de febrero de 2003]

[26] Referencia [23].

[27] Gaiker participa en un proyecto mundial (I.M.S.) de reciclado. (2002, diciembre). *Oldartu*, boletín externo, 36: p. 5. [<http://www.gaiker.es/web/oldartu/36.pdf>, 31 de marzo de 2003]

[28] RILEY, W.D; DAELLENBACH, C.B; GABLER, R.C.Jr. (1990). Recycling of Electronic Scrap. En: *Metals Handbook. Volume 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Tenth Edition. USA: ASM International. p. 1228-1231.

[29] Referencia [9]. p. 7.

[30] GRUPO DE TRABAJO TÉCNICO DEL CONVENIO DE BASILEA. (2002, 23 agosto). *Documento UNEP/CHW.6/21: Directrices técnicas para la identificación y el manejo ambientalmente racional de los desechos plásticos y para su eliminación*.



Ginebra: Sexta reunión de la Conferencia de la Partes en el Convenio de Basilea. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. p. 13.

[31] APME (Association of Plastic Manufacturers in Europe). (1997). *Plastics: a material of innovation for the electrical and electronic industry. Insight into consumption and recovery in Western Europe 1995*. Brussels: APME.

[32] ANARPLA (Asociación Nacional de Recicladores de Plástico). (1996). *El reciclado de plásticos en España*. Valencia: ANARPLA.

[33] VARGAS, L. (1997, febrero) *Reciclado químico de plásticos*. CEPIS. [<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind59/rqp/rqp.html>, consulta el 12 de septiembre de 2003]

[34] Referencia [30]. p.36.

[35] Referencia [9].

[36] Referencia [30]. p.41.

[37] HUTTERER, H; PILZ, H. (1998). *Cost Benefit Analysis of Plastic Recycling: Macroeconomic Assessment of Mechanical Recycling of Plastic Waste in Austria including Ecological Effects*. Vienna: Federal Environment Agency.

[38] Referencia [30]. p. 28-29.

[39] MIGUEL, R. (2000). Componentes eléctricos y electrónicos. *Simposium Internacional sobre el Reciclado*. Barcelona, marzo de 2000.

[40] Referencia [6].

